

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño del efector final FDM compatible con RobotStudio para un brazo  
robótico ABB IRB-2600

INGE-3010

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecatrónico**

Presentado por:

Sebastián Alejandro Chiriboga Cedillo

Adrián Arturo Pardo Cely

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

## Dedicatoria

---

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, Luis Chiriboga y Mónica Cedillo, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificio a lo largo de toda mi vida, valores que han sido fundamentales para mi formación personal y profesional. A mis hermanos, Jairo y Xavier, por ser parte esencial de mi vida, por su compañía, respaldo y motivación permanente en cada etapa del camino. A todos ellos, mi profundo agradecimiento por creer en mí y por ser un pilar fundamental para alcanzar este logro académico.

Sebastián Chiriboga Cedillo.

## Dedicatoria

---

El presente proyecto lo dedico a mis padres, Luis Pardo y Jessica Cely, por su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio que me han acompañado a lo largo de mi formación académica. Lo dedico también a mi familia, quienes con su apoyo constante me motivaron a nunca rendirme. A mis amigos y seres queridos, que con su compañía y palabras de aliento me hicieron más llevadero el camino. Y al cielo, para mi fiel compañero Caruzo, quien me acompañó en silencio gran parte de este viaje y cuyo recuerdo sigue vivo en mi corazón. A todos ellos, les ofrezco este logro con gratitud y cariño.

Adrián Pardo Cely.

## Agradecimientos

---

Expreso mi sincero agradecimiento a mi compañero de tesis, por el trabajo en equipo, el compromiso y el apoyo mutuo demostrado a lo largo del desarrollo de este proyecto. De manera especial, agradezco a mi tutor, PhD. Marcelo Fajardo, por su guía académica, orientación oportuna y valiosos aportes, que fueron fundamentales para el correcto desarrollo de la investigación. Asimismo, extiendo mi gratitud al Ing. Murillo y al Ing. Campoverde, por su constante disposición, seguimiento y apoyo técnico brindado durante todas las etapas del proyecto, contribuyendo de manera significativa al logro de los objetivos planteados.

Sebastián Chiriboga Cedillo.

## Agradecimientos

---

Agradezco de todo corazón a mis padres por demostrarme que, con perseverancia y muchas ganas, se puede salir adelante en la vida.

A los ingenieros Gabriel Murillo y Diego Campoverde, por la confianza depositada en nuestro equipo para la realización de este proyecto, así como por sus valiosos consejos y enseñanzas.

Al Ph.D. Marcelo Fajardo, por su acertada guía, conocimientos y disposición durante todo el desarrollo de esta tesis.

Y a mi amigo y colega, Sebastián Chiriboga, por su perseverancia desde el inicio hasta el fin de nuestro proyecto, así como a todas las personas que aportaron de distintas maneras para alcanzar esta meta.

Adrián Pardo Cely.

## Declaración Expresa

---

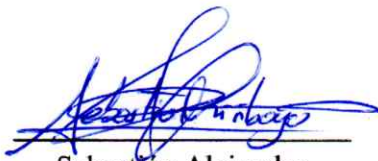
Nosotros Sebastián Alejandro Chiriboga Cedillo y Adrian Arturo Pardo Cely acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 03 de septiembre del 2025.



Sebastián Alejandro  
Chiriboga Cedillo



Adrian Arturo Pardo Cely

# **Evaluadores**

---

**Bryan Joao Puruncajas Maza, Ph.D.**

Profesor de Materia

---

**Marcelo Rodolfo Fajardo Pruna, Ph.D.**

Tutor de proyecto

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar un efector final para manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM) compatible con el robot industrial ABB IRB 2600, con el fin de integrar un sistema de impresión 3D que permita ampliar el volumen efectivo de fabricación frente a las limitaciones del espacio de impresión de las impresoras FDM convencionales. Se planteo como hipótesis que la integración de un efector FDM controlado mediante comunicación TCP/IP permita una coordinación adecuada entre el movimiento del sistema y la extrusión del material, garantizando un proceso estable y repetible. La justificación del proyecto se fundamentó en la necesidad de superar las restricciones dimensionales presentes en los equipos FDM tradicionales, las cuales limitan la fabricación de piezas de mayor tamaño en entornos de investigación y desarrollo.

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo mediante el diseño mecánico, electrónico y de control del efector final, empleando herramientas CAD, simulación en RobotStudio, un microcontrolador Arduino Mega, módulos de comunicación Ethernet y componentes electrónicos de potencia, considerando compatibilidad del sistema.

Los resultados demostraron una integración funcional del efector final, una comunicación estable entre dispositivos y una extrusión continua del material.

Se concluye que el efector final diseñado constituye una solución viable para procesos de manufactura aditiva con mayor capacidad de impresión y potencial de aplicación en futuros desarrollos tecnológicos.

**Palabras Clave:** Manufactura aditiva, Efector final, Impresión 3D, Comunicación TCP/IP, Integración mecatrónica.

**ABSTRACT**

*The objective of this project is to design an end-effector for Fused Deposition Modeling (FDM) additive manufacturing compatible with the ABB IRB 2600 industrial robot, in order to integrate a 3D printing system that allows for expanding the effective manufacturing volume, addressing the printing space limitations of conventional FDM printers. It was hypothesized that the integration of an FDM effector controlled via TCP/IP communication would allow for adequate coordination between the system's movement and material extrusion, guaranteeing a stable and repeatable process. The justification for the project was based on the need to overcome the dimensional restrictions present in traditional FDM equipment, which limit the fabrication of larger parts in research and development environments.*

*The project development was carried out through the mechanical, electronic, and control design of the end-effector, employing CAD tools, simulation in RobotStudio, an Arduino Mega microcontroller, Ethernet communication modules, and power electronic components, while considering system compatibility. The results demonstrated a functional integration of the end-effector, stable communication between devices, and continuous material extrusion. It is concluded that the designed end-effector constitutes a viable solution for additive manufacturing processes with greater printing capacity and potential for application in future technological developments.*

*Keywords: Additive Manufacturing, End-effector, 3D Printing, TCP/IP Communication and Mechatronic Integration.*

## ÍNDICES GENERAL

|  |      |
|--|------|
| Resumen.....   | I    |
| <i>Abstract</i> .....  | II   |
| Índices general .....  | III  |
| Abreviaturas.....  | VI   |
| Simbología .....   | VII  |
| Índice de figuras.....                                       | VIII |
| Índice de tablas .....                                       | X    |
| Índices de planos.....                                       | XI   |
| Capítulo 1.....  | 1    |
| 1.    Introducción .....                                     | 2    |
| 1.1    Descripción del problema.....                         | 3    |
| 1.2    Justificación del problema.....                       | 4    |
| 1.3    Objetivos .....                                       | 5    |
| 1.3.1    Objetivo general.....                               | 5    |
| 1.3.2    Objetivos específicos .....                         | 5    |
| 1.4    Marco teórico .....                                   | 6    |
| 1.4.1    Manufactura aditiva y tecnología FDM.....           | 6    |
| 1.4.2    Parámetros que afectan la calidad de impresión..... | 6    |
| 1.4.3    Impresión no-planar y robótica multieje.....        | 8    |
| 1.4.4    Criterios de diseño de efectores finales .....      | 8    |
| 1.4.5    Comunicación TCP/IP en sistemas industriales .....  | 10   |
| 1.4.6    Robot multifuncional ABB IRB 2600 .....             | 10   |
| 1.5    Estado del arte .....                                 | 11   |
| Capítulo 2.....  | 14   |
| 2.    Metodología .....                                      | 15   |
| 2.1    Requerimientos de diseño .....                        | 15   |

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| 2.2             | Alternativa de solución.....                                     | 16 |
| 2.3             | Proceso de diseño.....   | 17 |
| 2.4             | Diseño mecánico.....   | 18 |
| 2.4.1           | Análisis del sistema y definición de requerimientos.....         | 18 |
| 2.4.2           | Levantamiento de información geométrica y dimensional.....       | 19 |
| 2.5             | Diseño electrónico.....  | 21 |
| 2.5.1           | Selección de microcontrolador.....                               | 23 |
| 2.5.2           | Selección de drivers.....  | 24 |
| 2.5.3           | Dimensionamiento de suministro de energía.....                   | 26 |
| 2.5.4           | Diagrama de conexión.....  | 27 |
| 2.6             | Diseño de programación.....                                      | 27 |
| 2.6.1           | Definición lógica del programa - Comunicación TCP/IP.....        | 27 |
| 2.6.2           | Definición lógica del programa - Comandos de funcionamiento..... | 30 |
| 2.6.3           | Definición lógica del programa - Control de temperatura.....     | 33 |
| Capítulo 3..... |  | 36 |
| 3.              | Resultados y análisis.....                                       | 37 |
| 3.1             | Diseño mecánico.....   | 37 |
| 3.2             | Diseño electrónico.....  | 42 |
| 3.2.1           | Esquemático de conexiones.....                                   | 43 |
| 3.2.1.1         | Etapa de Alimentación.....                                       | 43 |
| 3.2.1.2         | Etapa de Movimiento.....   | 44 |
| 3.2.1.3         | Etapa de Potencia.....   | 44 |
| 3.2.1.4         | Etapa de Temperatura.....  | 44 |
| 3.2.2           | Placa PCB.....   | 44 |
| 3.2.3           | Integración del sistema electrónico.....                         | 46 |
| 3.3             | Diseño de control.....   | 46 |
| 3.3.1           | Control de temperatura.....                                      | 46 |

|  |    |
|--|----|
| 3.4 Resultados RobotStudio .....                     | 47 |
| 3.4.1 Modelo de efector final .....                  | 47 |
| 3.4.2 Definición del objeto de trabajo.....          | 49 |
| 3.4.3 Posprocesamiento de trayectorias .....         | 50 |
| 3.4.4 Creación de Interfaz Hombre-Maquina (HMI)..... | 51 |
| 3.5 Resultados de impresión.....                     | 53 |
| 3.5.1 Calibración del objeto de trabajo fisico ..... | 53 |
| 3.5.2 Consistencia del flujo de material.....        | 54 |
| 3.5.3 Precisión de las piezas.....                   | 56 |
| 3.6 Análisis de costo.....                           | 57 |
| 3.6.1 Costo de ingeniería.....                       | 57 |
| 3.6.2 Piezas mecánicas.....                          | 58 |
| 3.6.3 Componentes electrónicos .....                 | 58 |
| 3.6.4 Materiales.....                                | 60 |
| 3.7 Limitaciones .....                               | 60 |
| Capítulo 4.....                                      | 61 |
| 4. Conclusiones y Recomendaciones .....              | 62 |
| 4.1 Conclusiones.....                                | 62 |
| 4.2 Recomendaciones .....                            | 63 |
| Referencia .....                                     | 65 |
| Apéndices.....                                       | 70 |

**ABREVIATURAS**

|        |   |
|--------|---|
| ABB    | Asea Brown Boveri   |
| ABS    | Acrilonitrilo Butadieno Estireno                          |
| CAD    | Diseño Asistido por Computadora                           |
| FDM    | Modelado por Deposición Fundida                           |
| FFF    | Fabricación de Filamento Fundido                          |
| HMI    | Interfaz Hombre-Máquina                                   |
| MA     | Manufactura Aditiva                                       |
| MOSFET | Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor         |
| NTC    | Coficiente de Temperatura Negativa                        |
| PCB    | Placa de Circuito Impreso                                 |
| PID    | Proporcional-Integral-Derivativo                          |
| PLA    | Ácido Poliláctico   |
| PWM    | Modulación por Ancho de Pulso                             |
| RAM    | Sistemas de manufactura aditiva robótica                  |
| RAPID  | Lenguaje de programación utilizado por el controlador ABB |
| SCADA  | Control de Supervisión y Adquisición de Datos             |
| SPI    | Serial Peripheral Interface                               |
| TCP    | Transmission Control Protocol                             |
| TCP    | Tool Center Point   |
| TCP/IP | Transmission Control Protocol / Internet Protocol         |
| TPU    | Poliuretano Termoplástico                                 |
| UCS    | User Coordinate System                                    |
| WAAM   | Wire Arc Additive Manufacturing                           |

## SIMBOLOGÍA

|         |  |
|---------|--|
| A       | Amperio  |
| cm      | Centímetro   |
| °C      | Celsius  |
| $d_f$   | Diámetro del filamento                                 |
| e(t)    | Error de control                                       |
| h       | Altura de capa   |
| °K      | Kelvin   |
| k       | Coefficiente de extrusión                              |
| KB      | Kilobyte   |
| L       | Longitud desplazada                                    |
| M       | Métrica (Prefijo para roscas de tornillos, ej. M6, M8) |
| mA      | Miliamperio  |
| Mbps    | Megabits por segundo                                   |
| mm      | Milímetro  |
| mm/s    | Milímetros por segundo                                 |
| R       | Resistencia eléctrica                                  |
| s       | Segundo  |
| T       | Temperatura  |
| V       | Voltio   |
| VDC     | Voltios de Corriente Directa                           |
| w       | Ancho de extrusión                                     |
| W       | Vatio  |
| $\mu$ F | Microfaradio   |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | Arquitectura general del sistema de control y extrusión FDM..... | 16 |
| Figura 2  | Proceso de diseño .....  | 17 |
| Figura 3  | Dimensiones mecánicas del eje 4.....                             | 20 |
| Figura 4  | Dimensiones mecánicas brida .....                                | 21 |
| Figura 5  | Diagrama de arquitectura del sistema.....                        | 22 |
| Figura 6  | Diagrama de conexión esquemático.....                            | 27 |
| Figura 7  | Gestión de comunicación TCP .....                                | 29 |
| Figura 8  | Procesamiento de comandos de extrusión.....                      | 31 |
| Figura 9  | Control de temperatura .....                                     | 34 |
| Figura 10 | Acople carrete TPU .....   | 38 |
| Figura 11 | Acople de circuito eléctrico.....                                | 39 |
| Figura 12 | Acople de guía de filamento.....                                 | 40 |
| Figura 13 | Acople de guía de cableado.....                                  | 40 |
| Figura 14 | Acople extrusor .....  | 41 |
| Figura 15 | Diseño final .....   | 42 |
| Figura 16 | Diagrama esquemático. ....                                       | 43 |
| Figura 17 | Enrutado de pistas y dimensionamiento de la placa.....           | 45 |
| Figura 18 | Placa PCB para el sistema electrónico .....                      | 45 |
| Figura 19 | Sistema electrónico integrado.....                               | 46 |
| Figura 20 | Grafica Temperatura vs Setpoint.....                             | 47 |
| Figura 21 | Creación de herramienta y colocación de TCP .....                | 48 |
| Figura 22 | Orientación del sistema de referencia del TCP .....              | 48 |
| Figura 23 | Integración del efector final.....                               | 49 |
| Figura 24 | Creación de objeto de trabajo .....                              | 50 |
| Figura 25 | Simulación de trayectorias. ....                                 | 51 |
| Figura 26 | Pantalla principal del Flexpendant .....                         | 52 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 27 Calibración del objeto de trabajo, mediante reloj comparador..... | 53 |
| Figura 28 Impresión de falda y primera capa. ....                           | 54 |
| Figura 29 Impresión de relleno del objeto .....                             | 55 |
| Figura 30 Adhesión entre capas.....   | 56 |
| Figura 31 Medición experimental de la pieza manufacturada .....             | 57 |

**ÍNDICE DE TABLAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Requerimientos de diseño.....                       | 15 |
| Tabla 2 Especificaciones del microcontrolador.....          | 23 |
| Tabla 3 Especificaciones del módulo ethernet.....           | 24 |
| Tabla 4 Especificaciones del driver A4988 .....             | 25 |
| Tabla 5 Especificaciones del MOSFET P55NF06.....            | 25 |
| Tabla 6 Circuitos de potencia (24 VDC) .....                | 26 |
| Tabla 7 Circuitos de control y lógica (5 VDC).....          | 26 |
| Tabla 8 Costo de ingeniería .....                           | 57 |
| Tabla 9 Costos de los componentes del diseño mecánico ..... | 58 |
| Tabla 10 Costos de componentes electrónicos .....           | 59 |
| Table 11 Costo de materiales.....                           | 60 |

**ÍNDICES DE PLANOS**

|         |                              |
|---------|------------------------------|
| Plano 1 | Efecto final parte frontal   |
| Plano 2 | Efecto final parte posterior |
| Plano 3 | Acople carrete TPU           |
| Plano 4 | Tapa carrete                 |
| Plano 5 | Acople circuito              |
| Plano 6 | Acople cableado              |
| Plano 7 | Acople de guía de filamento  |
| Plano 8 | Efecto final                 |
| Plano 9 | Acople carrete completo      |

# Capítulo 1

## 1. Introducción

Las industrias actuales enfrentan el reto de fabricar piezas cada vez más complejas y precisas, impulsadas por las exigencias de la Industria 4.0. En este contexto, la manufactura aditiva, conocida también como impresión 3D, se ha convertido en una herramienta esencial para la innovación, ya que permite crear geometrías personalizadas, reducir el desperdicio de material y optimizar recursos. En 2022, las impresoras 3D industriales representaron más del 70 % del mercado global, demostrando su creciente importancia en sectores como la automotriz, médica y electrónica [1]. Aun así, su adopción masiva sigue limitada por factores como la velocidad de producción, el uso excesivo de soportes y la baja adhesión entre capas.

El presente proyecto busca aportar una solución innovadora al diseñar un efector final FDM para un robot ABB IRB 2600, con el propósito de integrar la robótica industrial a la MA. Desde un punto de vista tecnológico, esta propuesta representa una optimización de los procesos de impresión 3D, mejorando la eficiencia y reduciendo el desperdicio de material. Además, al automatizar la deposición del filamento y permitir trayectorias no planas, el sistema ofrece mayor libertad geométrica y mejor calidad superficial. A nivel social y económico, la incorporación de este tipo de tecnologías contribuye a la creación de cadenas productivas más sostenibles y competitivas, fomentando la innovación y el desarrollo industrial local [2].

Los sistemas actuales de MA todavía enfrentan desafíos técnicos importantes, como el exceso de soportes, los largos tiempos de fabricación y la falta de estandarización. Por ello, este proyecto propone una alternativa que combina la precisión de la robótica con la flexibilidad de la impresión 3D. Con ello, se busca fortalecer las capacidades del Laboratorio de Manufactura y Robótica Industrial de la ESPOL y generar una base tecnológica aplicable en entornos industriales de bajo o mediano volumen.

## 1.1 Descripción del problema

La manufactura aditiva (MA) ha tenido un gran impacto en la última década como una alternativa versátil para la fabricación de piezas personalizadas, geometrías complejas y componentes de bajo volumen, beneficiando sectores como la industria automotriz, aeroespacial, biomédica y de construcción. Dentro de sus diferentes métodos, la extrusión de filamento fundido (FDM) destaca por su simplicidad, bajo costo y facilidad de integración, lo que ha impulsado su adaptación en entornos industriales y de investigación [3]. Sin embargo, el crecimiento de las exigencias productivas ha revelado limitaciones en las impresoras FDM tradicionales e industriales, particularmente en términos de espacio de trabajo, rigidez estructural y escalabilidad, factores que restringen su uso en la fabricación de componentes de gran tamaño o en geometrías no convencionales [4].

En paralelo, los robots multifuncionales de 6 ejes han experimentado una expansión significativa en su utilidad; debido a su alta precisión, repetibilidad y capacidad para operar en trayectorias multidireccionales. Robots como el ABB IRB 2600 han demostrado un desempeño sobresaliente en tareas de manipulación, soldadura, pulido, ensamblaje y manufactura avanzada, convirtiéndose en equipos altamente adaptables a nuevas tecnologías [5]. Esta convergencia tecnológica ha llevado a la exploración de la MA robótica, que combina las capacidades de deposición de material con la libertad de movimiento de los robots industriales, permitiendo superar barreras de volumen y ampliar el alcance de la impresión 3D hacia estructuras a gran escala [6].

A pesar de su potencial, la integración entre robots industriales y extrusores FDM enfrenta problemas técnicos no resueltos. Entre ellos destacan: la ausencia de efectores finales especializados para deposición continua, la falta de sincronización precisa entre velocidad del robot y caudal del extrusor, y la escasa estandarización en interfaces mecánicas, eléctricas y de control. Estos obstáculos han limitado el desarrollo de sistemas RAM, impidiendo su adopción

masiva y generando una brecha tecnológica entre la MA tradicional y la manufactura asistida por robots [7].

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar un efector final FDM optimizado para el ABB IRB 2600, validado mediante simulación en entornos como RobotStudio. Este desarrollo permitiría a la industria explorar nuevas capacidades de la MA, cerrar la brecha tecnológica existente y avanzar hacia sistemas de impresión 3D escalables, capaces de producir estructuras complejas y de gran tamaño con materiales avanzados. Con ello, se habilitaría un uso más completo y estratégico de los robots multifuncionales, alineado con las tendencias emergentes de producción flexible e inteligente.

## **1.2 Justificación del problema**

El Laboratorio de Manufactura y Robótica Industrial de ESPOL busca potenciar sus capacidades tecnológicas mediante la integración de procesos de MA avanzados con el robot industrial ABB IRB 2600.

Las limitaciones al proceso tradicional, como el uso excesivo de soportes, tiempos prolongados de fabricación, motivan la exploración de estrategias no planares apoyadas en sistemas robóticos multieje.

A pesar del alto potencial del ABB IRB 2600 para ejecutar trayectorias complejas, el laboratorio no dispone de un efector final para manufactura aditiva FDM, ni de una integración compatible del efector final con RobotStudio. Esta carencia impide aprovechar la libertad de movimiento del robot, limita la experimentación con trayectorias no planares y restringe el desarrollo de impresión 3D avanzada.

Por ello, el diseño e implementación de un efector final FDM adaptado a las características mecánicas, eléctricas y de control del robot ABB IRB 2600 resulta fundamental. Además, este debe ser compatible con el software RobotStudio, con el fin de llevar a cabo el proceso de impresión 3D totalmente integrado, y no verse afectado por falta de comunicación

entre controlador y microprocesador. Con el fin de sincronizar los comandos de movimiento del robot con los parámetros de extrusión, temperatura y velocidad de deposición del material.

Esto garantiza que el flujo de filamento y la trayectoria robótica se coordinen de manera precisa, evitando defectos en la pieza impresa, interrupciones en la deposición o errores de posicionamiento. De esta forma, la integración efectiva entre hardware y software contribuye a obtener una manufactura aditiva estable, lo que asegura la calidad de la pieza, y la eficiencia en el proceso de fabricación. Esta solución permitirá ampliar las capacidades del laboratorio, fomentar proyectos de investigación y formación práctica en manufactura aditiva robótica.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar un efector final para FDM, para un robot ABB IRB 2600, considerando las condiciones mecánicas, eléctricas y de integración con el sistema de impresión, con el fin de incorporar el proceso de fabricación aditiva.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Analizar los requerimientos funcionales, mecánicos y eléctricos necesarios para el diseño del efector final que permita el proceso de manufactura aditiva FDM.
2. Modelar y simular el efector final en software CAD y de simulación robótica, verificando su compatibilidad y desempeño con el robot ABB IRB 2600 durante las trayectorias de impresión.
3. Evaluar el desempeño del sistema acoplado mediante pruebas de funcionamiento, con el fin de validar la precisión, repetibilidad y calidad del proceso de manufactura aditiva automatizada.

## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 *Manufactura aditiva y tecnología FDM.*

La manufactura aditiva, también conocida como impresión 3D, consiste en una agrupación de técnicas, las cuales se construye un objeto tridimensional, capa por capa, a partir de un modelo digital. A diferencia de los procesos tradicionales de fabricación sustractiva, que retiran material, la MA añade material donde es necesario, lo que permite fabricar geometrías complejas con menor desperdicio [8].

Una de las técnicas más conocidas de la manufactura aditiva, es el Modelado por Deposición Fundida (FDM), o también conocido como Fabricación de Filamento Fundido (FFF), en donde un material termoplástico es fundido y extruido a través de una boquilla que deposita material capa tras capa acorde a una trayectoria predeterminada [8].

El método por FDM ha sido de gran utilidad por la simplicidad, versatilidad de materiales y bajo coste de equipamiento, lo cual lo vuelve atractivo para áreas como prototipado rápido y producción personalizada.

### 1.4.2 *Parámetros que afectan la calidad de impresión.*

El proceso de FDM depende de un conjunto de parámetros de operación que determinan directamente la precisión dimensional, la resistencia mecánica, la adhesión entre capas y el acabado superficial de las piezas impresas [8].

Diversos estudios coinciden en que la calidad final del producto depende de la interacción entre parámetros térmicos, geométricos y de deposición, los cuales deben optimizarse de forma conjunta para garantizar un desempeño adecuado del material y la geometría.

- **Temperatura del extrusor:** La temperatura del extrusor controla el grado de fusión del filamento termoplástico y la capacidad de adherencia entre capas consecutivas. Si la temperatura es demasiado baja, el material no se funde completamente, generando

porosidad y una mala unión interlaminar. Por el contrario, si la temperatura es demasiado alta, puede causar sobreextrusión, degradación térmica del polímero o deformaciones en la pieza [9].

- **Velocidad de Impresión:** La velocidad a la que se desplaza el cabezal de extrusión, durante la deposición, afecta tanto la precisión geométrica como el enfriamiento y la adhesión del material fundido. Velocidades altas pueden provocar subextrusión o pérdida de detalle, mientras que velocidades demasiado bajas generan sobrecalentamiento y deformación de las capas inferiores [10].
- **Altura de Capa:** Una menor altura de capa (0,1 mm o menos) mejora la precisión dimensional y la textura superficial, pero aumenta el tiempo de impresión, mientras que una mayor altura (0,2 mm) acelera la producción a cambio de una menor definición geométrica y adhesión entre capas [11].
- **Orientación de la pieza y ángulo de deposición:** Las piezas orientadas con capas paralelas a la dirección principal de carga presentan menor resistencia a aquellas impresas con capas o trayectorias alineadas a las tensiones principales. En procesos no-planar, el ángulo de deposición variable permite mejorar la resistencia entre capas y eliminar la necesidad de soportes, ya que el robot puede ajustar la orientación de la boquilla respecto al contorno de la superficie [12].
- **Adhesión entre capas y anisotropía mecánica:** La unión entre capas depende de la temperatura, la presión de deposición y el tiempo de contacto. Cuando el material se enfría muy rápido o la velocidad de impresión es muy alta, las capas no se fusionan correctamente. Esto genera anisotropía mecánica, en donde las piezas son más débiles en dirección vertical (eje Z) que en dirección horizontal (planos XY), siendo más propensas a separarse entre capas [13].

### ***1.4.3 Impresión no-planar y robótica multieje.***

Varios métodos de fabricación aditiva se basan en la deposición de material controlado sobre una superficie plana. El uso de capas planas simplifica el hardware necesario para llevar a cabo la impresión 3D [14].

La fabricación mediante capas exclusivamente horizontales restringe el potencial de los procesos de manufactura aditiva por deposición de material. Sin embargo, el uso de robots multieje permite superar esta limitación al posibilitar la deposición sobre trayectorias tridimensionales complejas, ampliando considerablemente las capacidades de estos sistemas de fabricación.

Diversos estudios muestran que la generación de trayectorias de deposición no-planar contribuye a una mejor aproximación geométrica al modelo CAD, superficies más lisas y, en algunos casos, propiedades mecánicas superiores [15].

### ***1.4.4 Criterios de diseño de efectores finales.***

El diseño de un efector final requiere comprender y adaptar características de efectores utilizados en procesos como soldadura, pintura, pulido, mecanizado, etc. Algunas de las características relevantes de estos son la masa estructural, rigidez y la orientación. Estos factores influyen sobre la precisión, la repetibilidad y el rendimiento dinámico del robot, por lo que es necesario considerar estas características para el diseño de un efector de deposición fundida.

Según lo planteado por Karpiński y Wojciechowski [16], la masa y la distribución inercial del efector condicionan el comportamiento dinámico del manipulador, afectando su capacidad para seguir trayectorias suaves y precisas bajo condiciones aceleradas. Por esta razón, se debe minimizar la masa del efector y ubicar el centro de gravedad lo más cercano a la brida del robot para evitar vibración y errores posicionales.

Por otro lado, la rigidez estructural cumple un rol esencial en el diseño de un efector, ya que este factor determina la precisión del movimiento del extremo del robot. Se ha demostrado que la deflexión en el TCP aumenta de manera significativa cuando el efector incorpora elementos con baja rigidez o cuando se introduce cargas desbalanceadas en el extremo del robot [17].

Esta sensibilidad es crítica en proceso de manufactura aditiva como la impresión 3D, donde la posición relativa entre la boquilla y la capa previamente depositada debe mantenerse dentro de tolerancias específicas. Investigaciones en elastostática de robots indican que incluso deformaciones elásticas de pequeña magnitud pueden traducirse en desviaciones acumulativas a lo largo de la trayectoria, afectando directamente la calidad del cordón y la precisión inter-capa [18]. Por ello, el efector debe diseñarse con una geometría compacta y resistente, empleando materiales de alta rigidez y minimizando zonas susceptibles a flexión.

También, la orientación y el posicionamiento del efector desempeñan un rol esencial en la calidad de los procesos robotizados. En aplicaciones como soldadura o pintura se ha documentado que la boquilla u herramienta terminal opera con ángulos entre  $45^\circ$  y  $90^\circ$ , rango que optimiza la penetración del cordón, la estabilidad del arco o la uniformidad del recubrimiento [19]. En soldadura plana automatizada, varios estudios muestran que mantener una orientación fija a lo largo de la trayectoria mejora la repetibilidad del proceso y reduce defectos en la junta [20].

Por esta razón, la deposición en superficies no planas destaca que la boquilla debe alinearse con la normal local del sustrato para garantizar un flujo estable del material y una deposición controlada en geometrías complejas [14]. En consecuencia, la orientación del efector final en procesos de manufactura aditiva debe definirse cuidadosamente, ya que de ella dependen la estabilidad del proceso, la uniformidad del cordón y la calidad final de la pieza.

#### **1.4.5 Comunicación TCP/IP en sistemas industriales.**

La comunicación basada en los protocolos TCP/IP ha alcanzado un papel esencial en los sistemas industriales modernos, debido a que permiten la integración entre diferentes niveles de automatización, desde dispositivos de campo hasta sistemas de supervisión y gestión en la nube. El modelo TCP/IP, derivado del esquema OSI, proporciona una arquitectura en capas que facilita la interoperabilidad entre equipos heterogéneos y define reglas de comunicación necesarios para el intercambio confiable de datos entre nodos [21].

En los entornos de automatización industrial, esta arquitectura se implementa principalmente en redes Ethernet industriales, permitiendo que sensores, controladores lógicos, robots y sistemas SCADA se comuniquen utilizando protocolos de aplicación como Modbus TCP y EtherNet/IP [22].

Entre las principales ventajas del uso de TCP/IP en sistemas industriales destacan la interoperabilidad entre dispositivos de distintos fabricantes, la escalabilidad de la red mediante la incorporación de nuevos nodos sin rediseñar toda la arquitectura y la reutilización de infraestructura Ethernet ya disponibles en la mayoría de las industrias [23]. Asimismo, el empleo de TCP/IP posibilita la conexión con plataformas de supervisión y análisis de datos, facilitando el mantenimiento predictivo, la trazabilidad de procesos y optimización energética.

La integración de TCP/IP en la industria representa un gran adelanto hacia una automatización más conectada, flexible y eficiente; alineada con los principios de la industria 4.0. No obstante, su adopción requiere un diseño cuidadoso que considere los requisitos de tiempo real, la seguridad, la compatibilidad con equipos existentes y la calidad del servicio en la red.

#### **1.4.6 Robot multifuncional ABB IRB 2600.**

El ABB IRB 2600 es un robot industrial multifuncional de seis grados de libertad diseñado para ofrecer una combinación optimizada de capacidad de carga y alcance extendido.

Su arquitectura le permite realizar una amplia variedad de tareas industriales, como la soldadura de arco y la manipulación de materiales. Debido a sus seis ejes, el manipulador posee la flexibilidad cinemática necesaria para acceder a piezas desde orientaciones complejas y operar en entornos restringidos. [24].

Una de las características más críticas de este modelo es su precisión de movimiento. El IRB 2600 presenta una repetibilidad de posición de 0.04 mm, esta alta repetibilidad garantiza que el efector final pueda volver a una posición programada con una desviación mínima, cualidad indispensable para procesos que requieren estándares de calidad rigurosos y consistencia milimétrica durante operaciones continuas y repetitivas [24].

En cuanto a su zona de trabajo, el robot ofrece un volumen operativo superior al de las máquinas cartesianas convencionales. Mientras que una impresora 3D de escritorio estándar, como la Prusa i3 MK3S+, limita su volumen de construcción a un cubo de 250x210x210 mm [25], y una impresora industrial de gran formato como la Stratasys F900 alcanza dimensiones máximas de 914x610x914 mm [26]; el ABB IRB 2600 ofrece un alcance radial de 1650 mm desde su base [24]. Esto genera una zona de trabajo cuasi-esférica que permite manipular o procesar objetos de dimensiones significativamente mayores, superando las restricciones físicas impuestas por los pórticos rígidos de los sistemas de coordenadas cartesianas.

## **1.5 Estado del arte**

El desarrollo de la manufactura aditiva en el ámbito industrial ha tenido un crecimiento significativo, impulsando por la necesidad de fabricar componentes de gran escala, reducir desperdicios y aumentar la flexibilidad productiva. A diferencia de los sistemas de impresión 3D tradicional, las aplicaciones industriales han incorporado tecnologías capaces de procesar distintos materiales como cemento, metales y polímeros; permitiendo la fabricación de piezas funcionales en sectores como la construcción, la industria naval y automotriz. Estas tecnologías

han demostrado que la impresión 3D industrial no se limita al uso de plásticos, sino que abarca una amplia variedad de materiales y escalas de fabricación [4].

Uno de los primeros avances destacados en la impresión 3D industrial a gran escala surge en el sector de la construcción, donde se desarrollaron sistemas con el potencial de imprimir estructuras de concreto directamente en la obra. Estos sistemas utilizan mezclas cementicias, especialmente formuladas para ser extruidas de manera continua, permitiendo la fabricación de muros, elementos estructurales y componentes arquitectónicos de gran escala. Los estudios establecen una reducción en el tiempo de construcción y en el uso de encofrados tradicionales; sin embargo, se identifican limitaciones relacionadas con la resistencia mecánica a largo plazo y la estandarización normativa del proceso [27].

Por otro lado, en el ámbito de la manufactura metálica, se han desarrollado proyectos industriales basados en el proceso de fabricación aditiva por arco de alambre (WAAM) para la fabricación de componentes de gran escala. Investigaciones indican que la producción de piezas estructurales empleados en sectores automovilísticos y aeronáuticos, incluyendo brazos de suspensión, soportes estructurales y componentes aeronáuticos de aluminio y titanio. Proyectos evidenciaron que WAAM permite altas tasas de deposición de material y una reducción considerable de desperdicios. No obstante, estos estudios también indican desafíos importantes en el acabado superficial, el control dimensional y la homogeneidad microestructural del material depositado, limitando su uso directo si etapas de mecanizado. [28].

En aplicaciones aeronáuticas y de transporte, la manufactura aditiva metálica ha sido empleada para fabricar componentes estructurales y piezas funcionales optimizadas en peso, contribuyendo a la reducción de masa total y al aumento de la eficiencia energética. Proyectos industriales muestran la fabricación de refuerzos estructurales y piezas de soporte mediante WAAM, demostrando la viabilidad técnica para componentes de gran tamaño. Sin embargo,

estos desarrollos resaltan la necesidad de un control preciso de los parámetros de proceso y de sistemas de monitorización en tiempo real para garantizar la calidad de las piezas [29].

## **Capítulo 2**

## 2. Metodología

A continuación, se presenta el desarrollo del diseño de un efector final para un sistema de extrusión para impresión FDM, considerando la integración de microcontroladores, comunicación, actuadores y programación del sistema para asegurar el cumplimiento de las necesidades del proceso.

### 2.1 Requerimientos de diseño

En la Tabla 1 se detallan los requerimientos de diseño establecidos para el desarrollo del efector final destinado a la integración del sistema de impresión FDM en el robot industrial. Estos requerimientos se definieron a partir de las necesidades planteadas por el cliente, las limitaciones mecánicas del manipulador y las condiciones operativas del proceso.

**Tabla 1**

*Requerimientos de diseño*

| Requerimientos          | Descripción   |
|-------------------------|---|
| Comunicación            | El sistema debe permitir la comunicación en tiempo real entre el robot ABB y un microcontrolador de bajo costo por protocolo TCP/IP.  |
| Área de trabajo         | El diseño debe garantizar una distancia segura entre el efector final y el último eslabón del robot, evitando colisiones y considerando el diámetro del cuerpo final del manipulador. |
| Compatibilidad mecánica | El mecanismo de fijación del efector final debe ser compatible con la brida del robot y con la base del extrusor creality ender 3, permitiendo montaje firme y seguro.                |
| Montaje y desmontaje    | El sistema debe permitir el ensamblaje y desensamble del equipo de impresión FDM sin necesidad de herramientas especiales.  |
| Mantenimiento           | El diseño debe permitir la realización de mantenimiento preventivo y correctivo de manera simple, facilitando el acceso a boquilla, ventiladores y cableado.                          |
| Seguridad               | El sistema debe considerar medidas de seguridad frente a las altas temperaturas del extrusor (200–250°C), evitando contacto accidental con superficies calientes.                     |

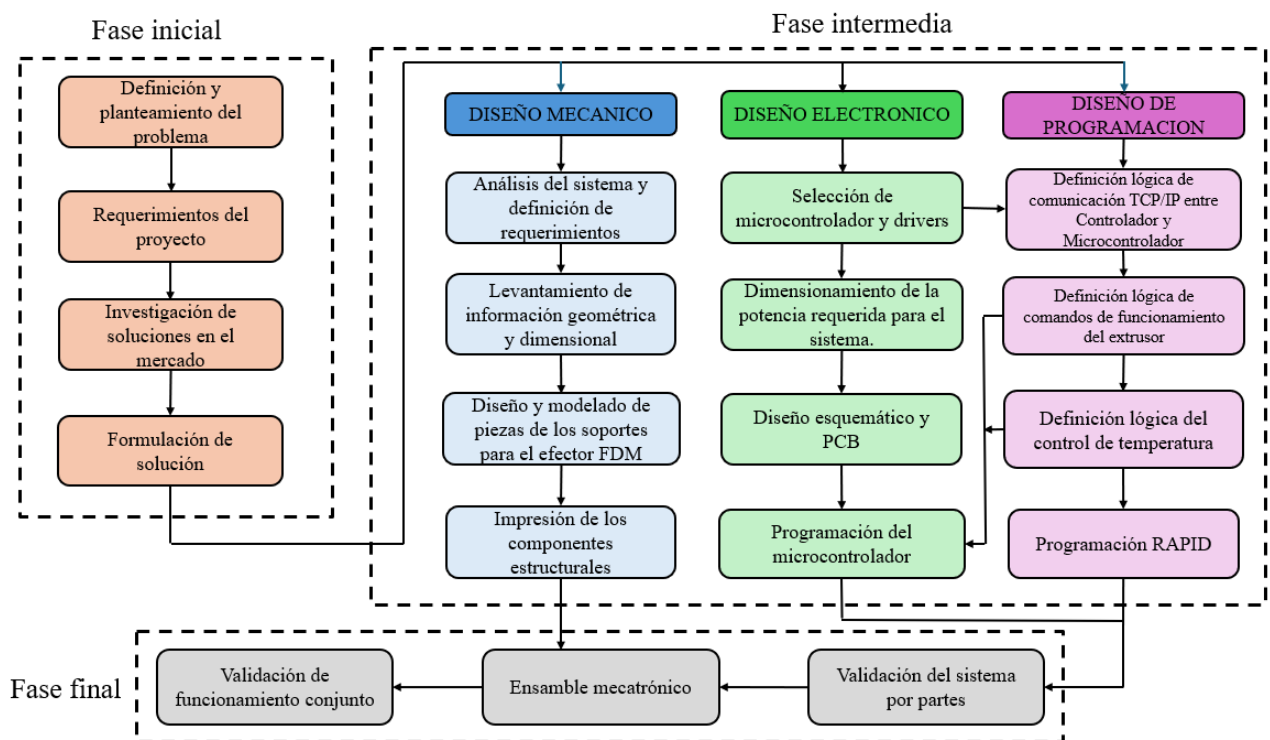


FDM y el robot permitió la deposición de material siguiendo trayectorias complejas, logrando una solución modular, flexible y adecuada para impresión 3D robótica.

## 2.3 Proceso de diseño

El diagrama presentado en la Figura 2 representa un flujo de desarrollo técnico dividido en cuatro etapas.

**Figura 2**  
Proceso de diseño



El proceso de desarrollo del sistema se divide en tres etapas principales. En la fase inicial, se identifica y plantea el problema, se definen los requerimientos del proyecto y se analizan soluciones existentes para formular la alternativa más adecuada.

En la fase intermedia, se desarrolla el diseño mecánico, electrónico y de programación, incluyendo el modelado e impresión de componentes, la selección y dimensionamiento de los elementos electrónicos, así como la definición de la lógica de control, comunicación y programación del sistema.

Finalmente, en la fase final, se integran todos los subsistemas mediante el ensamble mecatrónico y se realizan pruebas de validación por partes y de funcionamiento conjunto para garantizar el correcto desempeño del sistema.

## **2.4 Diseño mecánico**

En esta sección se presentan los requerimientos dimensionales y mecánicos considerados para asegurar la correcta interconexión entre el circuito electrónico, el extrusor y el brazo robótico ABB IRB 2600. Asimismo, se describen las consideraciones relacionadas con las interfaces de acople, los sistemas de fijación y las restricciones geométricas impuestas por el manipulador, las cuales condicionan el diseño de los elementos mecánicos necesarios para el proceso de manufactura aditiva.

### ***2.4.1 Análisis del sistema y definición de requerimientos.***

En esta primera etapa se realizó el análisis del sistema robótico para plantear los requerimientos necesarios para la implementación del proceso de manufactura aditiva asistida por robot. Uno de los requerimientos principales descubiertos en el análisis del sistema robótico fue la ubicación del sistema electrónico, con el objetivo de facilitar la conexión entre el circuito de control, el robot y el extrusor. Esta disposición permitió reducir la longitud del cableado y mejorar el acceso para tareas de montaje y mantenimiento.

Asimismo, se definió la necesidad de incorporar una estructura mecánica destinada al soporte del carrete de filamento TPU, la cual debía permitir el giro libre del material durante el proceso de impresión, evitando restricciones o esfuerzos adicionales en el sistema de alimentación del extrusor. Este requerimiento fue fundamental para garantizar un suministro continuo y uniforme del filamento.

Adicionalmente, se estableció como requerimiento la integración de soportes y guías para el manejo del filamento y del cableado asociado, con el fin de evitar enredos, interferencias o colisiones con el brazo robótico durante su movimiento. La correcta gestión de estos

elementos resultó esencial para preservar la seguridad del sistema y la estabilidad del proceso de manufactura aditiva.

Finalmente, se definió el requerimiento de diseño del efector final que permitiera la integración mecánica entre la brida del brazo robótico y el extrusor, asegurando una fijación firme, precisa y alineada. Este componente debe garantizar la estabilidad del extrusor durante la operación, sin generar interferencias con los ejes del manipulador ni comprometer el rango de movimiento del robot.

#### ***2.4.2 Levantamiento de información geométrica y dimensional.***

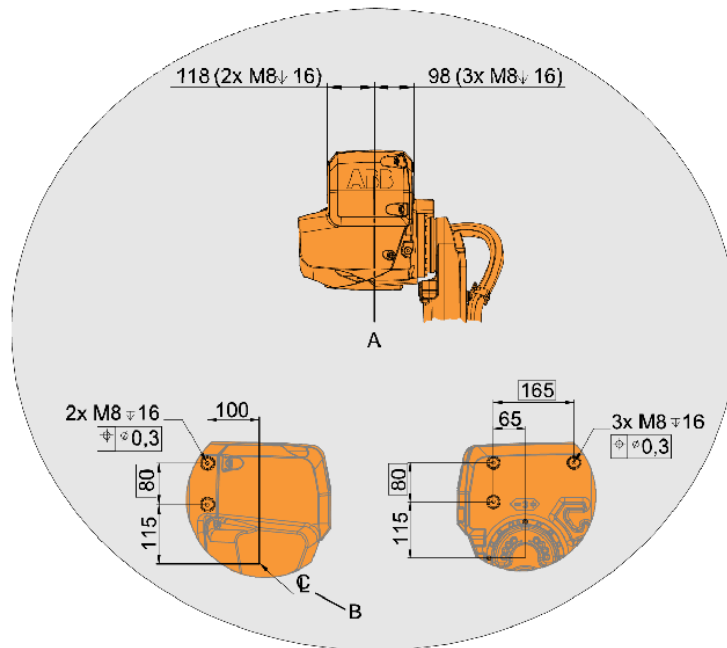
Una vez definidos los requerimientos en la sección anterior, se procedió al levantamiento de información geométrica y dimensional del ABB IRB 2600. En esta etapa se analizó las dimensiones normalizadas de la brida y de los puntos de fijación disponibles en el eje correspondiente.

En la Figura 3 se presentan las dimensiones mecánicas correspondientes al eje 4 del brazo robótico ABB IRB 2600, el cual constituye una de las principales zonas para la integración de los elementos mecánicos del sistema planteados anteriormente. Esta sección dispone de una superficie amplia, con dimensiones aproximadas de 21,5 cm × 16,5 cm, así como de orificios de fijación para pernos M8, lo que facilita la instalación de las piezas de acople de manera sencilla, segura y estructuralmente estable sobre el equipo.

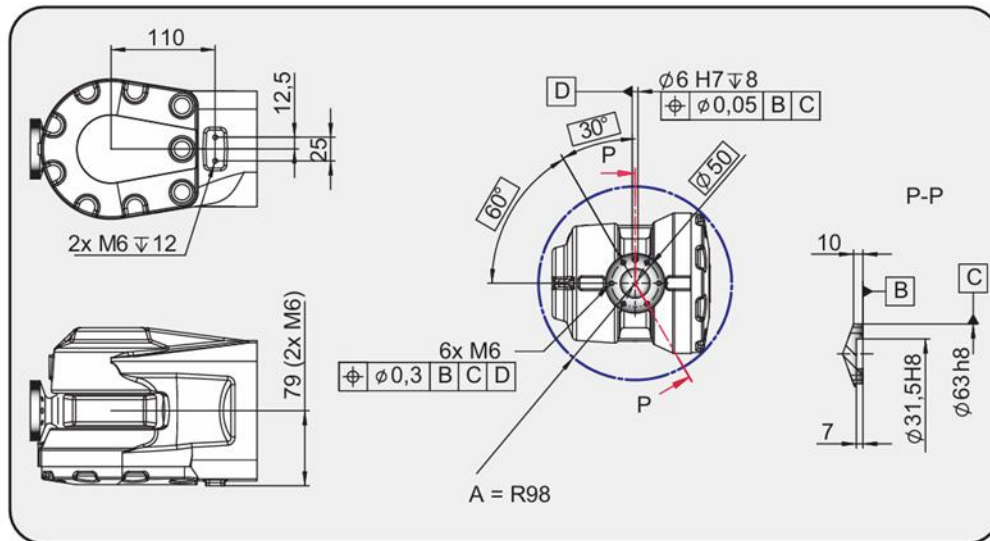
### Figura 3

#### Dimensiones mecánicas del eje 4

IRB 2600 estándar



Por otro lado; en la Figura 4, se presentan las dimensiones correspondientes a la brida del manipulador, la cual constituye la zona principal para la integración del extrusor en el eje final del robot ABB IRB 2600. Esta sección presenta un diámetro aproximado de 6.3 cm y dispone de orificios de fijación para pernos M6, distribuidos uniformemente con una separación angular de  $60^\circ$ . Esta configuración proporciona un total de seis puntos de fijación, los cuales permiten asegurar de manera firme y estable la pieza necesaria para la integración del extrusor al brazo robótico.

**Figura 4***Dimensiones mecánicas brida***IRB 2600 estándar**

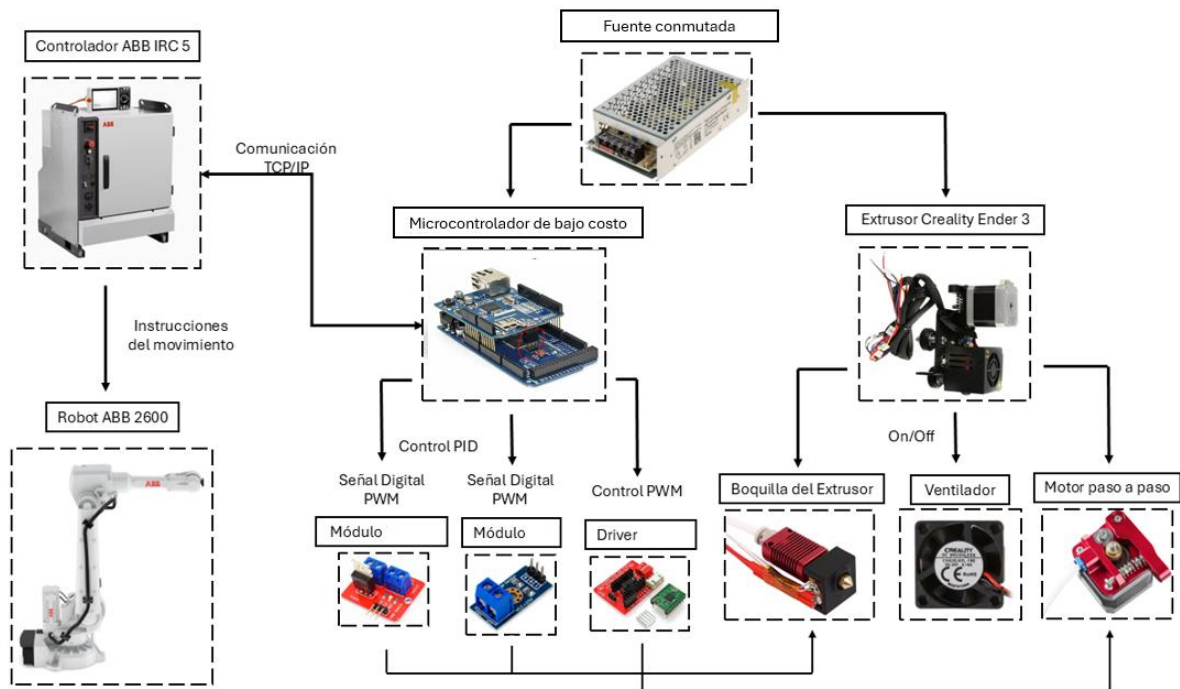
En consecuencia, estas dimensiones se establecen como parámetros geométricos de referencia obligatorios dentro del proceso de diseño de las diferentes piezas, al representar restricciones físicas preexistentes del sistema robótico que condicionan y delimitan las decisiones de diseño adoptadas.

## 2.5 Diseño electrónico

El diseño electrónico del sistema de extrusión se desarrolló considerando la integración funcional entre el extrusor FDM, el microcontrolador y el controlador del robot industrial ABB. El objetivo principal de esta etapa fue garantizar un control confiable de los actuadores del extrusor, así como la adquisición de señales, manteniendo la comunicación con el sistema robótico.

**Figura 5**

*Diagrama de arquitectura del sistema.*



Con respecto a la arquitectura mostrada en la Figura 5, el controlador ABB IRC5 se encargó del control de movimiento del robot ABB 2600, ejecutando las trayectorias definidas para el proceso. De manera simultánea, se estableció una comunicación TCP/IP con un microcontrolador, lo que permitió la sincronización entre el movimiento del robot y el sistema de manufactura aditiva FDM.

El microcontrolador gestionó el control general del extrusor, incluyendo la regulación de la temperatura, el accionamiento del motor de alimentación del filamento y el control del ventilador, a partir de señales de control digitales y PWM. La alimentación eléctrica fue provista por una fuente conmutada, garantizando el suministro energético tanto para el sistema de control como para el extrusor.

### 2.5.1 Selección de microcontrolador.

Existen diversos microcontroladores de uso comercial ampliamente adoptados debido a su bajo costo, facilidad de programación y disponibilidad de módulos de expansión. Entre los más utilizados se encuentran el arduino uno y el arduino mega.

**Tabla 2**

*Especificaciones del microcontrolador.*

| Característica                  | Arduino Uno       | Arduino Mega |
|---------------------------------|-------------------|--------------|
| Microcontrolador                | ATmega328P        | ATmega2560   |
| Memoria Flash                   | 32 KB             | 256 KB       |
| SRAM                            | 2 KB              | 8 KB         |
| EEPROM                          | 1 KB              | 4 KB         |
| Pines digitales I/O             | 14 (6 PWM)        | 54 (15 PWM)  |
| Entradas analógicas             | 6                 | 16           |
| Corriente total I/O             | 200 mA máx.       | 200 mA máx.  |
| TCP/IP (con Ethernet Shield)    | Limitado por SRAM | Más estable  |
| Capacidad para múltiples tareas | Baja              | Media        |

En la información presentada en la Tabla 2 el Arduino Mega fue identificado como la opción más adecuada frente al Arduino Uno. Esta selección se fundamentó en la mayor capacidad de memoria Flash y SRAM del Arduino Mega, lo que permitió la implementación de rutinas de comunicación TCP/IP, control de temperatura y control del motor paso a paso sin comprometer la estabilidad del sistema. En comparación, el Arduino Uno presentó limitaciones asociadas a su reducida memoria, especialmente para aplicaciones que requieren el manejo simultáneo de múltiples procesos.

Asimismo, la mayor cantidad de pines digitales, señales PWM y entradas analógicas del Arduino Mega facilitó la conexión de drivers, sensores y módulos de comunicación sin necesidad de hardware adicional.


Finalmente, su capacidad para ofrecer ejecución multitarea permitió garantizar la sincronización entre el control del extrusor y la comunicación con el robot industrial

Como parte de los requerimientos funcionales del sistema, se estableció un protocolo de comunicación que permita el intercambio de datos y la integración con otros dispositivos externos.

Se seleccionó el módulo Ethernet debido a su capacidad para proporcionar una comunicación estable, para el intercambio de datos entre el sistema y otros dispositivos en una red local, en este caso el controlador IRC del robot. Su interfaz de comunicación SPI permite una integración directa con el Arduino MEGA.

**Tabla 3**


*Especificaciones del módulo ethernet.*

| Figura de Referencia  | Parámetro                | Descripción |
|---|--------------------------|-------------|
|  | Circuito Integrado       | W5100       |
|   | Interfaz de comunicación | SPI         |
|   | Velocidad de transmisión | 10/100 Mbps |
|   | Tensión de operación     | 5 V         |
|   | Consumo de corriente     | ≈ 150 mA    |
|   | Protocolo                | TCP/IP      |
|   | Conector de red          | RJ45        |
|   | Compatibilidad           | Arduino     |
|   |                          | UNO/MEGA    |

### 2.5.2 Selección de drivers.


El driver A4988 se seleccionó para el control del motor paso a paso del extrusor, dada su capacidad para regular la corriente suministrada al motor y permitir un control preciso del movimiento mediante señales de paso y dirección. Su compatibilidad con niveles lógicos de 5V facilita la integración con el microcontrolador, mientras que la función de micro pasos mejora la resolución del movimiento.

**Tabla 4***Especificaciones del driver A4988*

| Figura de Referencia  | Parámetro                 | Descripción                   |
|---|---------------------------|-------------------------------|
|  | Modelo                    | A4988                         |
|   | Tipo de motor             | Paso a paso bipolar           |
|   | Tensión de alimentación   | 8 – 35 V                      |
|   | Tensión lógica            | 3.3 – 5 V                     |
|   | Corriente máxima por fase | 2 A                           |
|   | Resolución de micro pasos | Completo, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 |
|   | Interfaz de control       | STEP / DIR                    |
|   | Protección integrada      | Sobrecorriente y sobretensión |

Por otro lado, el MOSFET P55NF06 se seleccionó como elemento de conmutación en la etapa de potencia para el control del cartucho calefactor, debido a su alta capacidad de corriente y baja resistencia de conducción, lo que permite una conmutación eficiente mediante señales PWM.

**Tabla 5***Especificaciones del MOSFET P55NF06*

| Figura de Referencia  | Parámetro                  | Descripción    |
|---|----------------------------|----------------|
|  | Modelo                     | P55NF06        |
|   | Tipo                       | MOSFET canal N |
|   | Tensión de drenador (Vds)  | 60 V           |
|   | Corriente continua (Id)    | 55 A           |
|   | Tensión de compuerta (Vgs) | ±20 V          |
|   | Tipo de encapsulado        | TO-220         |

### 2.5.3 Dimensionamiento de suministro de energía.

Para el diseño del sistema electrónico se realizó el cálculo del consumo total de los componentes que conforman el extrusor y su electrónica de control, con el fin de dimensionar adecuadamente el suministro de energía y los elementos de protección asociados.

Considerando la selección de los dispositivos electrónicos y electromecánicos, la alimentación principal del sistema se establece en 24 VDC, la cual permite suministrar energía al cartucho calefactor, motor paso a paso, ventilador y a los circuitos de control.

**Tabla 6**

*Circuitos de potencia (24 VDC)*

| Componente                 | Voltaje | Corriente (A) |
|----------------------------|---------|---------------|
| Cartucho calefactor (40 W) | 24 VDC  | 1.67          |
| Motor paso a paso NEMA 17  | 24 VDC  | 1.50          |
| Ventilador del extrusor    | 24 VDC  | 0.20          |
| Total parcial (24 VDC)     | —       | 3.37          |

**Tabla 7**

*Circuitos de control y lógica (5 VDC)*

| Componente              | Voltaje | Corriente (A) |
|-------------------------|---------|---------------|
| Arduino MEGA            | 5 VDC   | 0.5           |
| Módulo Ethernet         | 5 VDC   | 0.15          |
| Driver A4988 (lógica)   | 5 VDC   | 0.01          |
| Termistor NTC 100k      | 5 VDC   | < 0.01        |
| Resistencias auxiliares | 5 VDC   | 0.02          |
| Total parcial (5 VDC)   | —       | 0.69          |

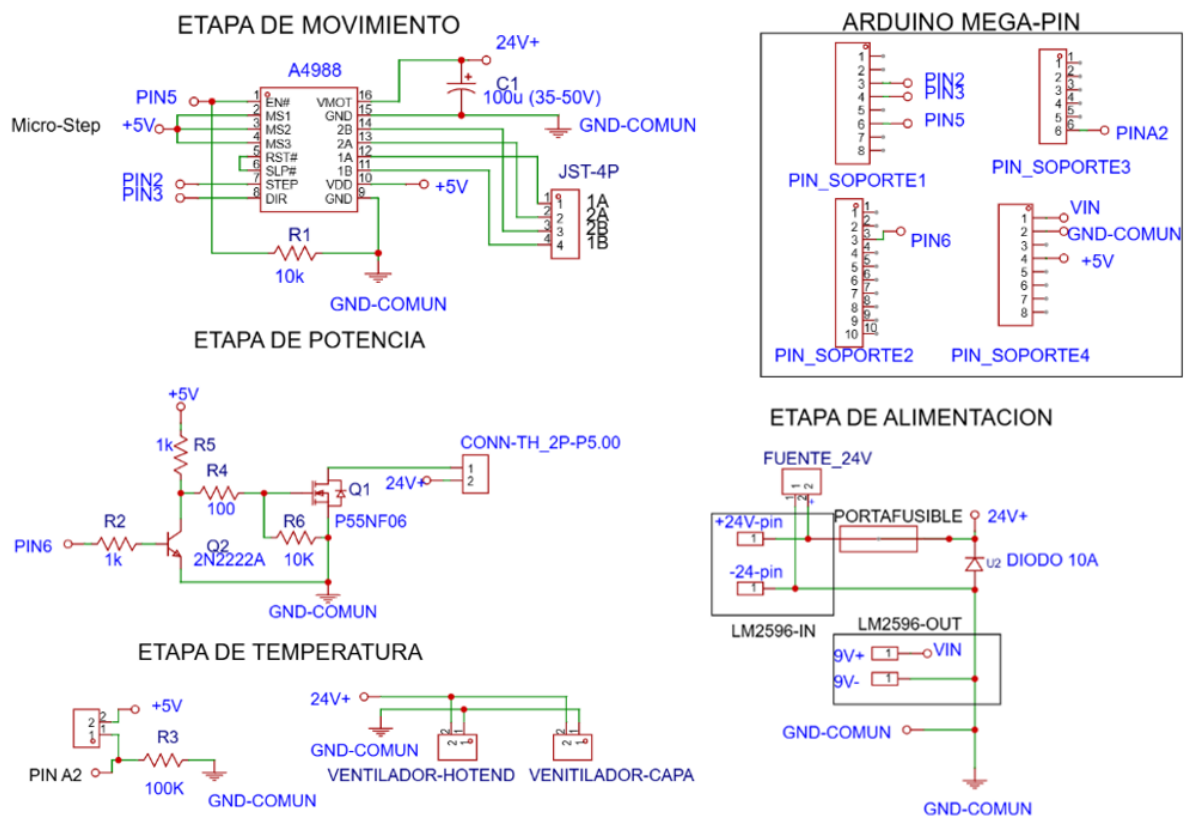
De acuerdo con los cálculos de consumo presentados en las tablas 6 y 7, la demanda de corriente continua del sistema es aproximadamente 4.06 A y se le añade un factor de seguridad de 1.5, para compensar pérdidas en el sistema, dando como resultado una corriente continua de 6.09A a 24VDC. Para garantizar un margen de operación adecuado y permitir la incorporación de dispositivos adicionales, se selecciona una fuente de alimentación de 24 VDC y 10 A.

### 2.5.4 Diagrama de conexión.

Luego de la selección del microcontrolador, drivers y dimensionamiento de la fuente de energía, se realizó el diagrama de conexiones de todos los componentes. Las conexiones realizadas se basaron acorde a los requerimientos de funcionamiento, y a las especificaciones en la hoja de datos del fabricante para cada componente.

**Figura 6**

*Diagrama de conexión esquemático.*



## 2.6 Diseño de programación

El diseño de la programación del sistema se estructuró a partir de diagramas de flujo, los cuales permiten definir la lógica de funcionamiento, la secuencia de operaciones y la interacción entre el robot ABB, el microcontrolador Arduino y el sistema de extrusión.

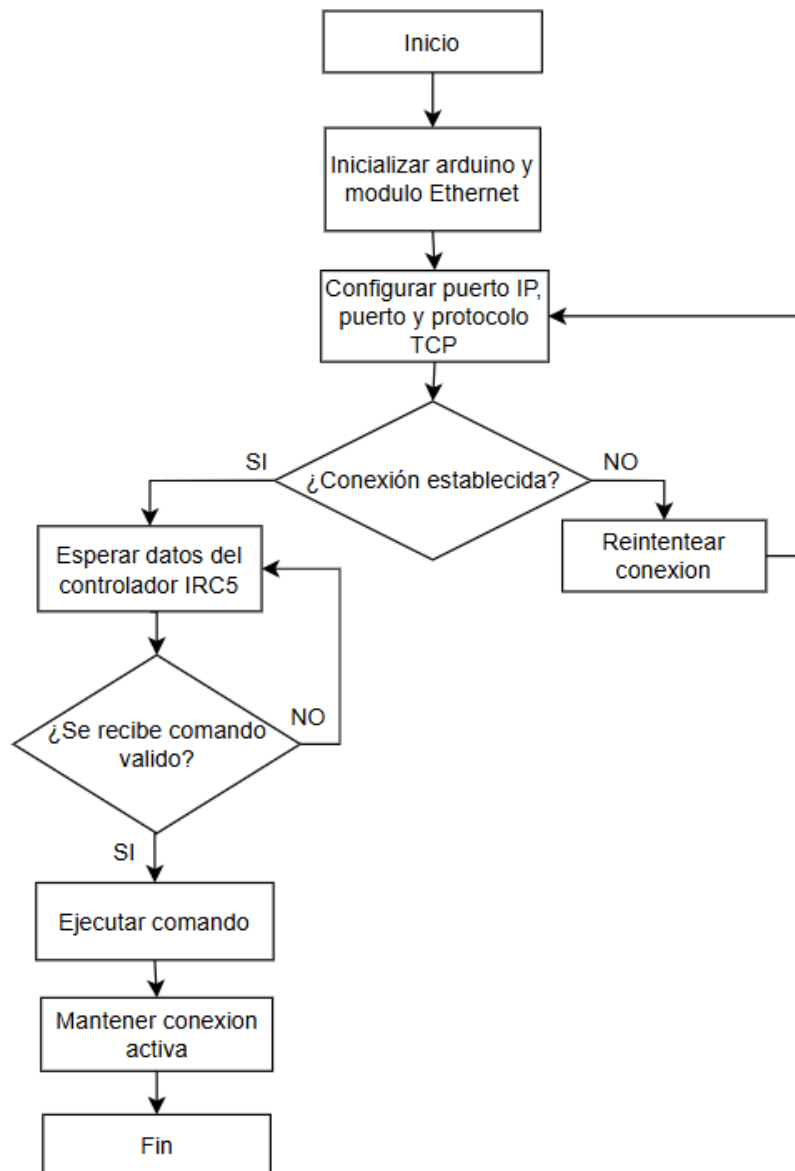
### 2.6.1 Definición lógica del programa - Comunicación TCP/IP.

El proceso inicializa con el Arduino y el módulo Ethernet Figura 7, garantizando que los recursos de hardware y comunicación se encuentren operativos. Posteriormente, la

configuración de los parámetros de red, tales como la dirección IP, el puerto de comunicación y el protocolo TCP, los cuales permiten establecer un canal de comunicación entre ambos dispositivos.

El sistema verifica si la conexión ha sido establecida correctamente. En caso de que la conexión no sea exitosa, el sistema entra en un ciclo de reintento de conexión, asegurando la robustez del proceso frente a fallos de red o interrupciones temporales. Cuando la conexión se establece, el sistema pasa a un estado de espera de datos provenientes del controlador IRC5.

En esta etapa, el Arduino permanece a la recepción de comandos enviados desde el robot. Cada comando recibido es validado para verificar su integridad y formato. Si el comando no es válido, el sistema regresa al estado de espera; caso contrario, se procede a la ejecución del comando recibido.

**Figura 7***Gestión de comunicación TCP*

En RAPID, la comunicación por sockets se basa en una secuencia clara y obligatoria de instrucciones que permiten al controlador ABB actuar como cliente TCP frente a un dispositivo externo como un Arduino.

- **SocketCreate:** Crea el objeto socket y reserva los recursos internos del controlador. No establece conexión ni transmite datos. Es obligatorio ejecutarlo primero.
- **SocketConnect:** Conecta el robot ABB como cliente TCP a una IP y puerto específicos. Abre la comunicación de forma persistente. Se ejecuta una sola vez.

- **SocketSend:** Envía datos a través del socket en formato texto. No es bloqueante. Requiere convertir valores numéricos a string.
- **SocketReceive:** Recibe datos desde el socket y los guarda en un string. Es bloqueante por defecto. Se recomienda usar tiempo de espera.

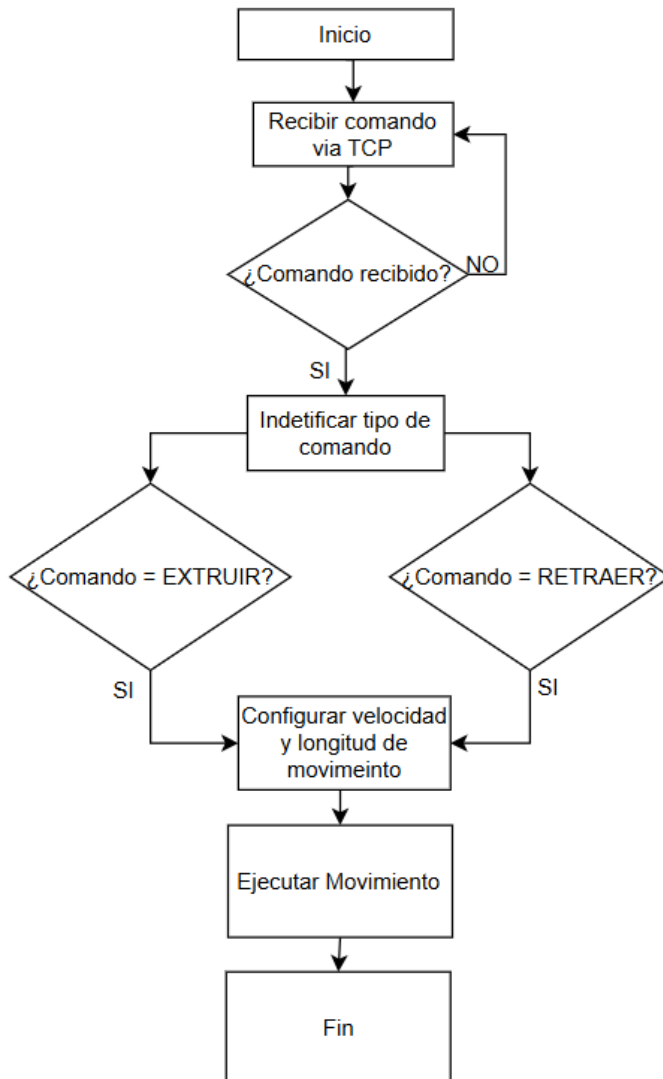
### ***2.6.2 Definición lógica del programa - Comandos de funcionamiento.***

En la segunda etapa se describe la lógica empleada para el procesamiento de comandos relacionados con el movimiento del extrusor en la Figura 8, los cuales son enviados a través de la comunicación TCP.

Dentro de esta lógica se contemplan dos comandos principales:

- **EXTRUIR:** Utilizado para avanzar el filamento durante el proceso de deposición de material.
- **RETRAER:** Empleado para realizar el retroceso del filamento, evitando sobre extrusión.

Una vez identificado el comando, el sistema configura los parámetros de movimiento, tales como la velocidad y la longitud del desplazamiento del motor del extrusor.

**Figura 8***Procesamiento de comandos de extrusión*

El movimiento del motor del extrusor se sincroniza directamente con la velocidad del TCP del robot ABB IRB 2600 estableciendo una relación proporcional entre el desplazamiento lineal del robot y la cantidad de filamento extruido. Para conseguir esto, primero se establece que el caudal volumétrico de material que entra al extrusor ( $Q_{in}$ ) debe ser igual al caudal del material depositado ( $Q_{out}$ ).

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (2.1)$$

Se asume una geometría de cordón simplificada de sección rectangular, donde el caudal de salida depende de la velocidad tangencial del robot ( $v_{TCP}$ ), la altura de capa ( $h$ ) y el ancho de línea ( $w$ ).

$$Q_{out} = w * h * v_{TCP} \quad (2.2)$$

Por otro lado, el caudal de entrada depende de la velocidad lineal a la que el filamento es empujado ( $v_{fil}$ ), y el área transversal del filamento (diámetro  $d_{fil}$ ).

$$Q_{in} = A_{fil} * v_{fil} = \frac{\pi * d_f^2}{4} * v_{fil} \quad (2.3)$$

Igualando las ecuaciones 2.2 y 2.3, y se despeja la velocidad lineal del filamento.

$$v_{fil} = v_{TCP} * \frac{h * w}{\frac{\pi * d_{fil}^2}{4}} = v_{TCP} * \frac{4 * h * w}{\pi * d_{fil}^2} \quad (2.4)$$

Para sincronizar el motor paso a paso con la velocidad TCP del robot, es necesario convertir esta velocidad a frecuencia de pulsos eléctricos ( $f_{step}$ ). La distancia lineal que avanza el filamento por cada revolución del engranaje de tracción esta dada por el perímetro. A su vez, el motor requiere 200 pasos físicos por revolución ( $\frac{1.8^\circ}{pasos}$ ), multiplicados por el factor de micro-pasos(m) configurado en el driver.

$$Pasos_{mm} = \frac{Pasos_{rev} * m}{\pi * D_{engrane}} = \frac{200 * m}{\pi * D_{engrane}} \quad (2.5)$$

Finalmente, la frecuencia se obtiene multiplicando la ecuación 2.4 de la velocidad del filamento por la ecuación 2.5 de la resolución de pasos del sistema.

$$f_{steps} = v_{TCP} * \frac{4 * h * w}{\pi * d_{fil}^2} * \frac{200 * m}{\pi * D_{engrane}} \quad (2.6)$$

- $v_{TCP}$ : Velocidad del TCP ( $\frac{mm}{s}$ )
- $h$  = Altura de capa (mm)
- $w$  = Ancho de extrusión (mm)
- $d_{fil}$  = Diámetro de filamento (mm)

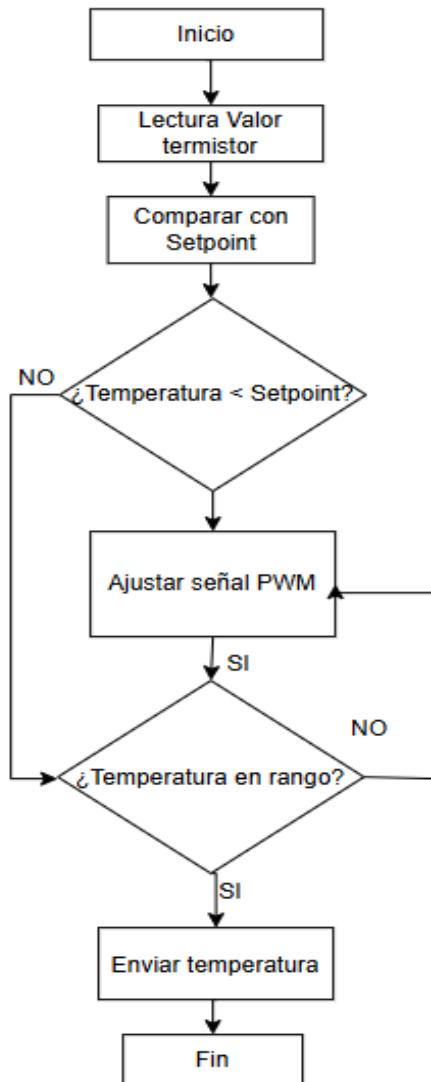
- $D_{engrane} = \text{Diametro del engrane (mm)}$
- $m$ : microstepping del driver

### **2.6.3 Definición lógica del programa - Control de temperatura.**

La tercera etapa corresponde al control de temperatura del extrusor Figura 9, el cual es un aspecto crítico en el proceso de manufactura aditiva FDM.

El proceso inicia con la lectura del valor del termistor, el cual proporciona la temperatura actual del cartucho calefactor. Este valor es comparado continuamente con un setpoint de temperatura previamente definido, correspondiente a la temperatura óptima de extrusión del material.

Si la temperatura medida es inferior al setpoint, el sistema ajusta la señal PWM aplicada al elemento calefactor, incrementando la potencia suministrada para elevar la temperatura. Este ajuste se realiza de manera iterativa hasta que la temperatura se encuentre dentro del rango establecido.

**Figura 9***Control de temperatura*

El control de temperatura del extrusor se realizó mediante un controlador PID, cuyo objetivo es mantener el cartucho calefactor en una temperatura de referencia constante durante el proceso de extrusión. La variable controlada es la temperatura del hotend y la variable manipulada es el ciclo de trabajo de la señal PWM aplicada al calefactor.

La medición de la temperatura se lleva a cabo con un termistor NTC, cuya conversión de resistencia a temperatura se efectúa mediante la ecuación de Steinhart–Hart:

$$\frac{1}{T} = c_1 + c_2 \ln(R) + c_3 (\ln(R))^3 \quad (2.7)$$

Donde:

$T$  temperatura absoluta en Kelvin,

$R$  resistencia del termistor

$c_1$ ,  $c_2$  y  $c_3$  coeficientes de resistencia con cambio en la temperatura.

El algoritmo de control se basa en la ley del PID clásico, definida como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$

Siendo  $e(t) = T_{ref} - T(t)$  el error de control. La acción proporcional corrige desviaciones instantáneas, la integral elimina el error en estado estacionario y la derivativa contribuye a amortiguar oscilaciones y mejorar la estabilidad térmica del sistema.

Los parámetros  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  fueron ajustados mediante un proceso de sintonización experimental, partiendo de una acción proporcional dominante e incorporando gradualmente los términos integral y derivativo hasta lograr una respuesta estable, rápida y sin sobre impulsos significativos.

## **Capítulo 3**

### 3. Resultados y análisis

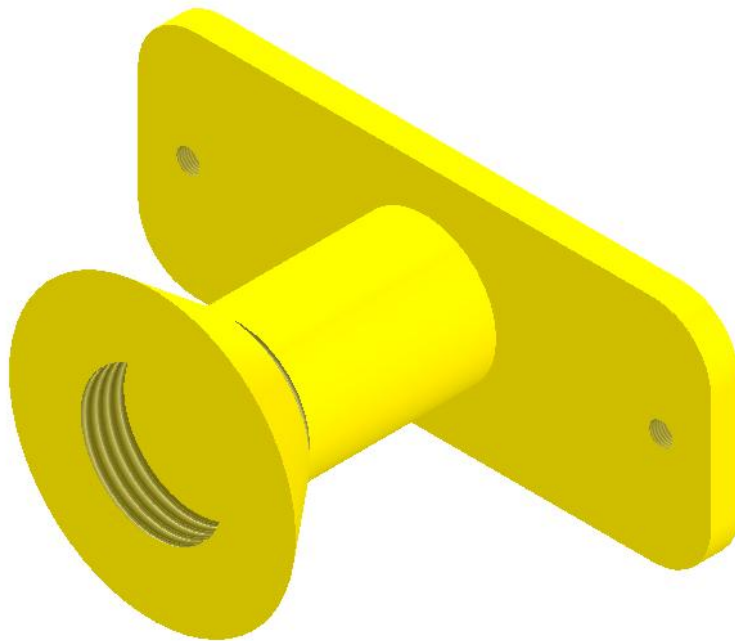
El presente capítulo se detalla la integración del sistema propuesto. Inicialmente, se expone el diseño y modelado mecánico de la estructura de acople para integrar el extrusor Creality Ender 3V en el efector final del robot ABB IRB 2600. Posteriormente, se aborda el desarrollo electrónico, abarcando desde el diagrama esquemático hasta la manufactura y ensamblaje de la PCB de control. Finalmente, se describe la lógica de control de temperatura implementada en Arduino, así como el despliegue de la interfaz hombre-máquina (HMI) para la operación del sistema.

#### 3.1 Diseño mecánico

El diseño mecánico del proyecto estuvo conformado por cuatro piezas destinadas a funcionar como elementos de acople. El desarrollo de estas piezas se basó en las dimensiones geométricas del brazo robótico ABB IRB 2600 en su configuración estándar y del extrusor Creality Ender 3V, con el fin de asegurar una integración precisa y adecuada tanto al manipulador como al extrusor.

En la Figura 10, indica la primera pieza de acople, la cual se diseñó para cumplir el requerimiento de brindarle un soporte al carrete del TPU, con el fin de mantener su posición durante la ejecución de la impresión 3D. Además, esta pieza va a la par con una tapa para que evite que el carrete se deslice durante el movimiento del brazo robótico. En la sección de acople, la pieza cuenta con dos pasos para pernos M8 con una distancia entre centro de 16,5 cm, lo que permite su correcta alineación y fijación con el manipulador.

Por otro lado, la sección destinada al alojamiento del carrete del filamento TPU tiene una longitud de 7 cm y un diámetro de 5 cm. Estas dimensiones se definieron considerando la estructura del carrete, el cual, cuenta con un ancho de 6,5 cm y un diámetro de 5,6 cm, esto permite que gire de manera libre y sin resistencia durante el proceso de impresión.

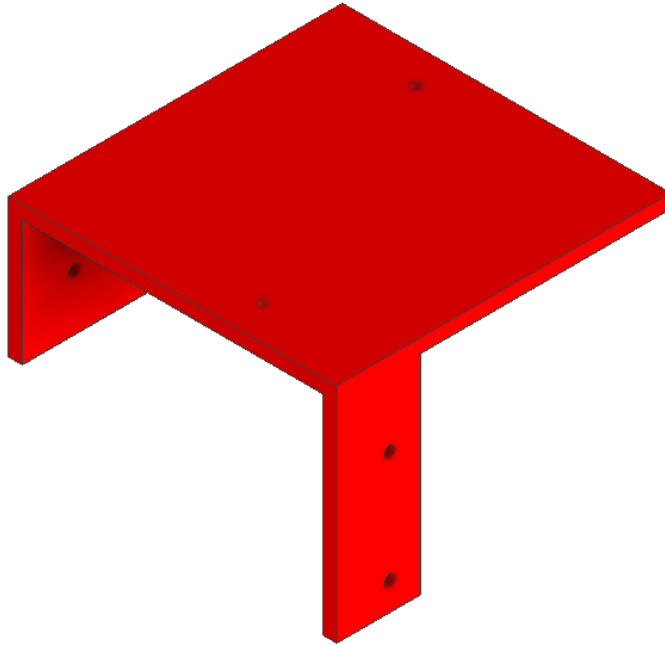
**Figura 10***Acople carrete TPU*

En la Figura 11, presenta la segunda pieza de acople, la cual se diseñó para el alojamiento y soporte del circuito electrónico del proyecto. Posee dimensiones de 23,6 cm x 24 cm, las cuales cumplen con las dimensiones del robot mencionadas en la Figura 3 de la sección anterior. Asimismo, se colocaron pasos para pernos M8 a una distancia entre centros de 16,5 cm y 8 cm respectivamente, para garantizar una adaptación precisa de la pieza en el manipulador.

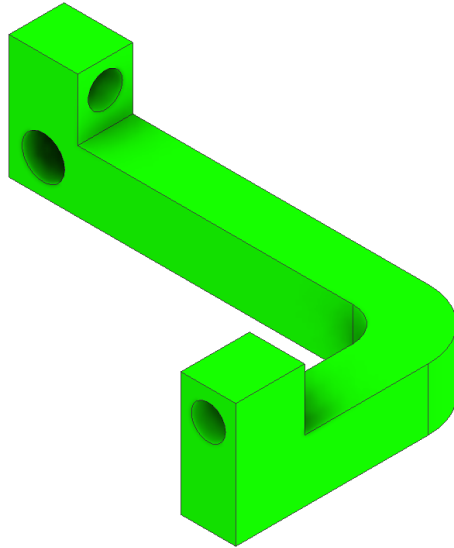
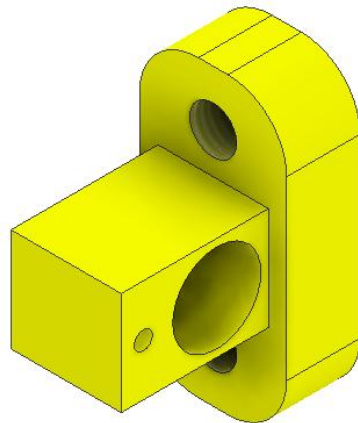
Adicionalmente, este elemento se integra con un gabinete plástico marca JSL de 220 x 170 x 120 mm, destinado al alojamiento de la etapa de control. Dicho cerramiento tiene la finalidad de aislar los componentes electrónicos de agentes externos, garantizando así la integridad física y la seguridad operativa del sistema.

**Figura 11**

*Acople de circuito eléctrico*



En las Figuras 12 y 13, muestra la tercera pieza de acople, la cual se encarga de guía para el filamento y el cableado del extrusor, para evitar enredos, interferencias o colisiones con el mismo brazo robótico durante la impresión 3D. Este acople es esencial para la seguridad del sistema y la estabilidad del proceso de manufactura aditiva.

**Figura 12***Acople de guía de filamento***Figura 13***Acople de guía de cableado*

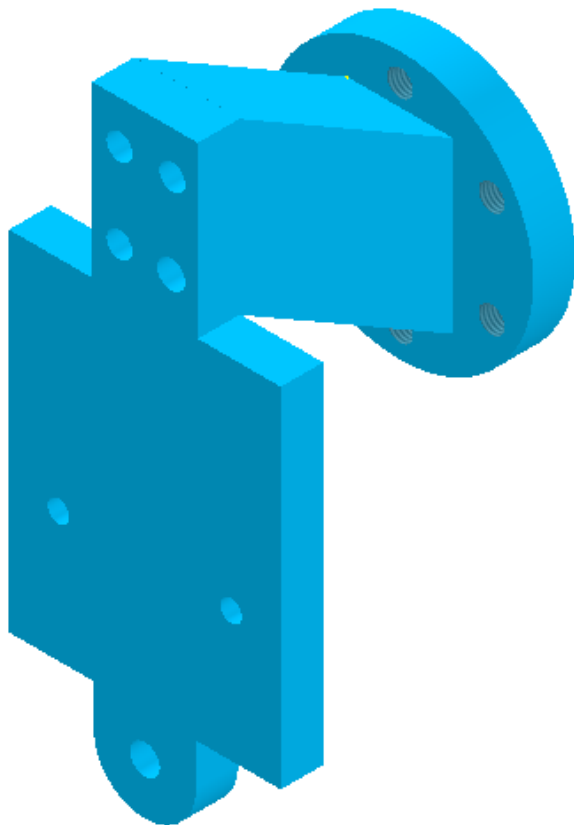
La Figura 14 ilustra el componente final que completa el ensamble mecánico propuesto. Este se encarga de adaptar el extrusor en la brida del brazo robótico. El diseño se ajustó para cumplir con el requerimiento espacial del sistema, el cual es, que la longitud total del efector final debe ser mayor al radio del eje 5 del manipulador para que no colisione en movimiento.

El diseño de la sección posterior de la pieza se basó en la brida del robot, esta tiene un diámetro de 6,3 cm y se estableció los pasos para pernos M6 sobre un diámetro de paso de 5 cm y con un ángulo de separación entre ellos de 60°.

Asimismo, el diseño de la cara frontal se adaptó a la morfología del extrusor, incorporando tres puntos de anclaje. Los dos frontales poseen un diámetro de 5 mm separados por una cota entre ejes de 40.7 mm, mientras que el anclaje posterior presenta un diámetro de 7 mm. Esta distribución geométrica permite una sujeción robusta, previniendo desalineamientos críticos ante las fuerzas inerciales generadas por el movimiento del robot.

#### **Figura 14**

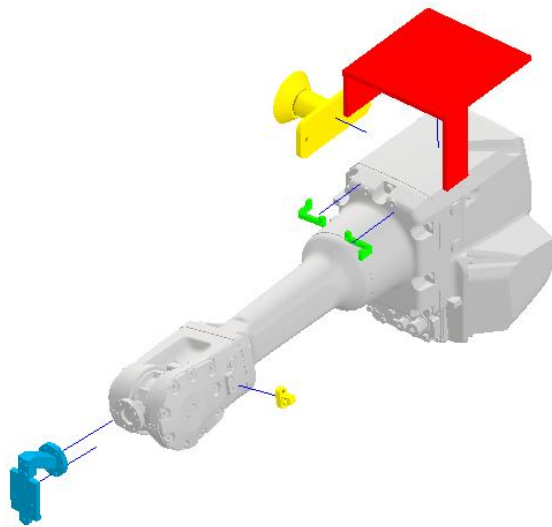
*Acople extrusor*



Finalmente, la Figura 15 exhibe la integración definitiva del subsistema mecánico sobre el manipulador ABB IRB 2600. El ensamble consolida los cuatro elementos diseñados: la interfaz de acople principal entre la brida y el extrusor, el soporte para la alimentación de TPU, el alojamiento para la electrónica de control y el sistema de guías para la gestión del cableado y filamento. En esta vista final, se valida la coherencia dimensional de dichos componentes, confirmando que su disposición espacial respeta el volumen de trabajo del manipulador, garantiza la ausencia de colisiones en las articulaciones críticas y asegura la correcta orientación del TCP para las tareas de manufactura aditiva.

### Figura 15

*Diseño final*



## 3.2 Diseño electrónico

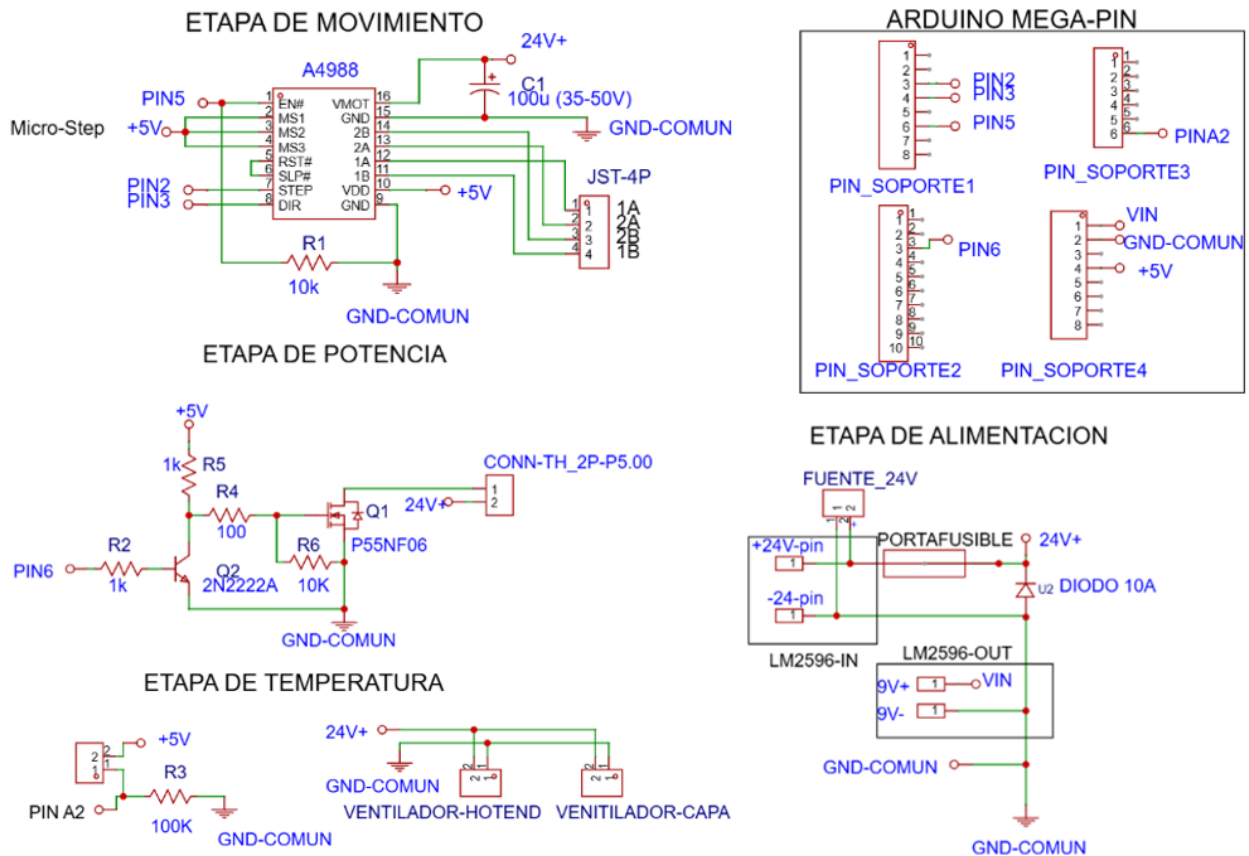
En este apartado se detalla el desarrollo del hardware electrónico, abarcando desde la generación del diagrama esquemático del circuito hasta la manufactura de la PCB. Esta placa consolida la etapa de control de movimiento y potencia, incorporando el driver A4988 y la conmutación mediante MOSFET, finalizando con la integración física de todos los componentes del sistema.

### 3.2.1 Esquemático de conexiones.

En la Figura 16, el esquema electrónico se dividió en bloques funcionales para garantizar la estabilidad, protección y control del sistema de extrusión

**Figura 16**

*Diagrama esquemático.*



#### 3.2.1.1 Etapa de Alimentación.

El diseño electrónico se basó en la placa Arduino Mega, con una alimentación principal de 24V-10A DC que ingresa a través de una etapa de protección con fusible y diodo rectificador para evitar daños por sobrecorriente o inversión de polaridad. Para garantizar la eficiencia energética de la lógica de control, se integra un convertidor LM2596 que reduce el voltaje de entrada a 9V.

### **3.2.1.2 Etapa de Movimiento.**

El control de movimiento del extrusor se ejecuta mediante un driver A4988, el cual permite la configuración de micropasos (*micro-stepping*) para precisión en la extrusión, e incorpora un capacitor de 100 $\mu$ F para filtración de ruido.

### **3.2.1.3 Etapa de Potencia.**

La etapa de potencia implementa una topología de conmutación de bajo lado (*Low-Side Switching*), donde un transistor BJT 2N2222A amplifica la señal lógica para disparar el MOSFET de potencia P55NF06.

### **3.2.1.4 Etapa de Temperatura.**

Este lazo de control se obtiene mediante la adquisición de datos de un termistor configurado en un divisor de tensión resistivo conectado al puerto analógico A2, mientras que el sistema de ventiladores se alimenta directamente del bus principal de 24V para asegurar una disipación térmica constante durante la operación.

## **3.2.2 Placa PCB.**

La Figura 17 muestra el diseño del circuito impreso (PCB) desarrollado para el sistema electrónico, el diseño incluye el enrutado de pistas, la distribución de componentes y las dimensiones de la tarjeta. Además, en la Figura 18 se integraron los distintos módulos electrónicos necesarios para el funcionamiento del sistema de MA.

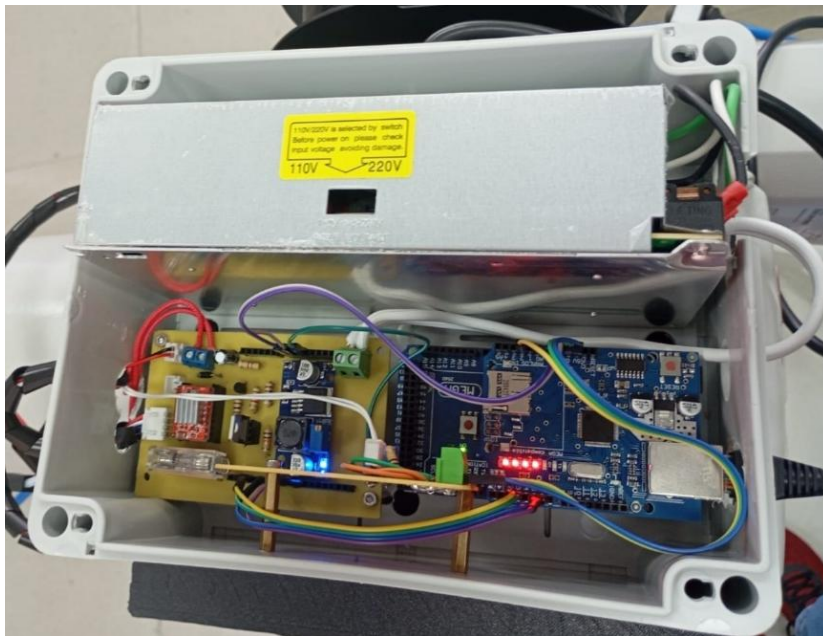


### 3.2.3 Integración del sistema electrónico.

La Figura 19 muestra el sistema electrónico completamente ensamblado dentro de un gabinete eléctrico, donde se integran la fuente de alimentación, la tarjeta electrónica diseñada, los módulos de control, comunicación basados en Arduino Mega y Ethernet, y las conexiones correspondientes al diagrama esquemático.

#### Figura 19

*Sistema electrónico integrado*



## 3.3 Diseño de control

Esta etapa se enfocó en evaluar el comportamiento del sistema térmico, el cual es clave en el proceso de manufactura aditiva, ya que un control adecuado de la temperatura es esencial para lograr una extrusión estable y una calidad de impresión consistente. En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de la respuesta del sistema térmico durante su operación.

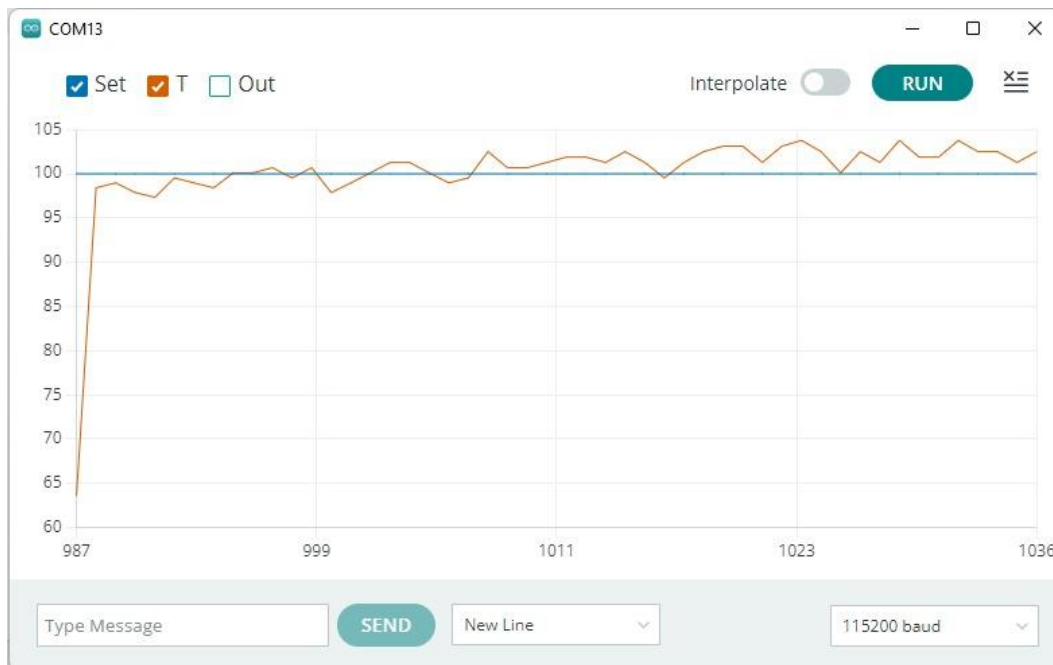
### 3.3.1 Control de temperatura.

La Figura 20 muestra el comportamiento dinámico del sistema de control térmico durante la fase de operación. Se observa una respuesta transitoria eficiente donde el sistema alcanza rápidamente la zona de prueba (100°C). Una vez en estado estacionario, la temperatura

real (línea naranja) mantiene una oscilación mínima alrededor del setpoint (línea azul), lo que valida la estabilidad del algoritmo de control para mantener la temperatura dentro del rango de fluidez necesario para el TPU.

## Figura 20

*Grafica Temperatura vs Setpoint*

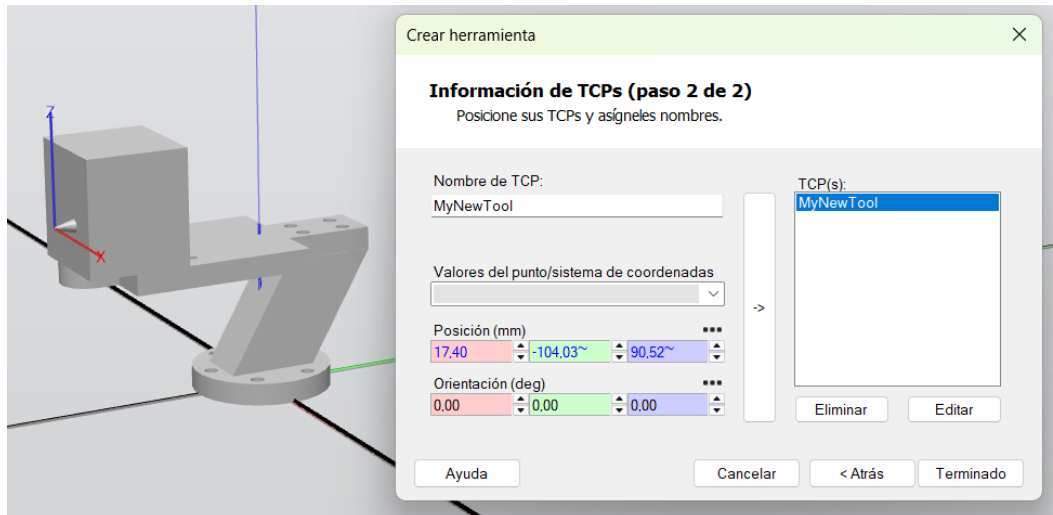


## 3.4 Resultados RobotStudio

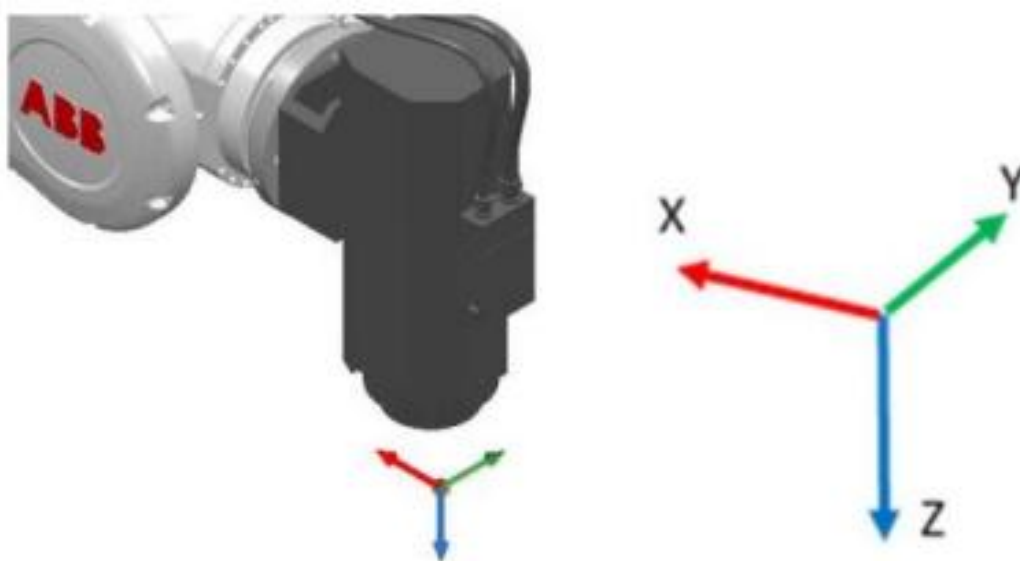
En la presente sección se exponen los resultados de la implementación y validación de los subsistemas en el entorno de RobotStudio. Se detalla el desarrollo de la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) destinada a gestionar la comunicación entre el sistema embebido y el controlador del robot. Adicionalmente, se describe el proceso de integración del efector final en el entorno de simulación para la verificación funcional y cinemática del sistema.

### 3.4.1 Modelo de efector final.

Para la integración del efector final con el software RobotStudio, se configuró la herramienta que estaría acoplada a la brida del robot, partiendo del modelado de un software CAD, se exportó el diseño en formato .SAT el cual es compatible con RobotStudio.

**Figura 21***Creación de herramienta y colocación de TCP*

Como se observa en la Figura 21, el TCP, Tool Center Point (Punto Centro de Herramienta), se coloca en la punta de la boquilla para que, al momento de definir un objeto de trabajo y realizar la simulación de las trayectorias, el efector final se encuentre bien posicionado.

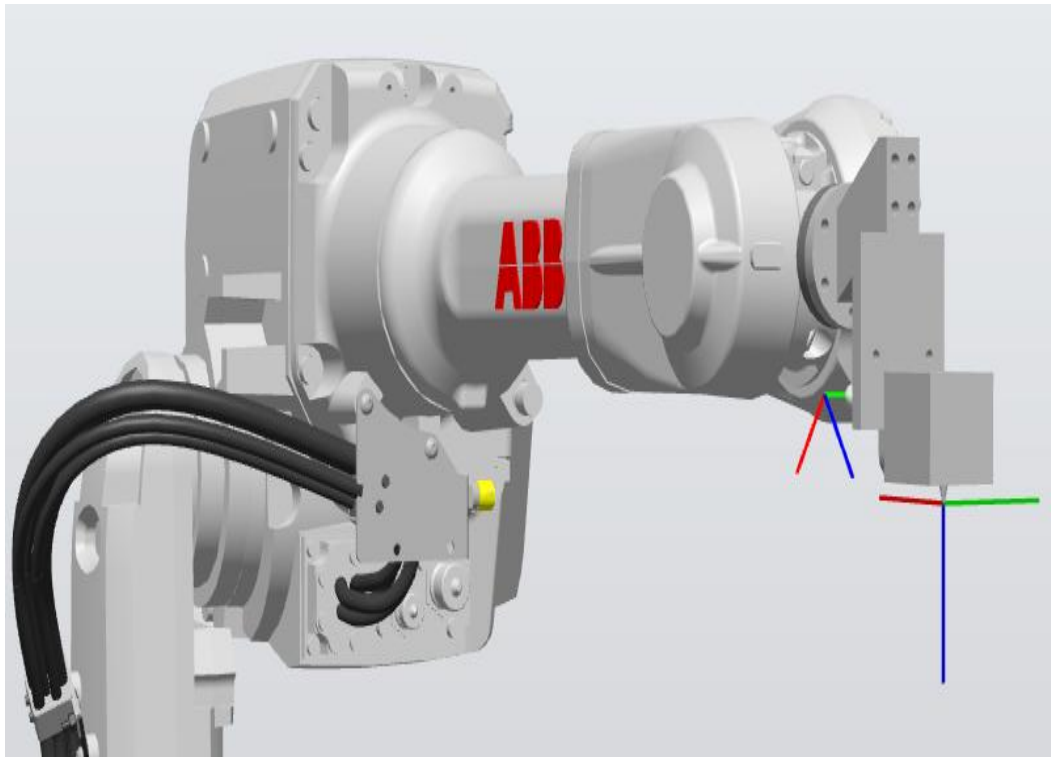
**Figura 22***Orientación del sistema de referencia del TCP*

*Nota: Si la orientación de la herramienta no es la especificada, la simulación no admitirá la aplicación correctamente.*

Cabe recalcar que la orientación del TCP se encuentra referenciada con respecto al “Mundo” del entorno de simulación, por lo que, acorde al manual de posprocesamiento de trayectorias dadas por ABB, se recomienda que la orientación se encuentre en la posición como se muestra en la Figura 22, para evitar fallas en la simulación de las trayectorias.

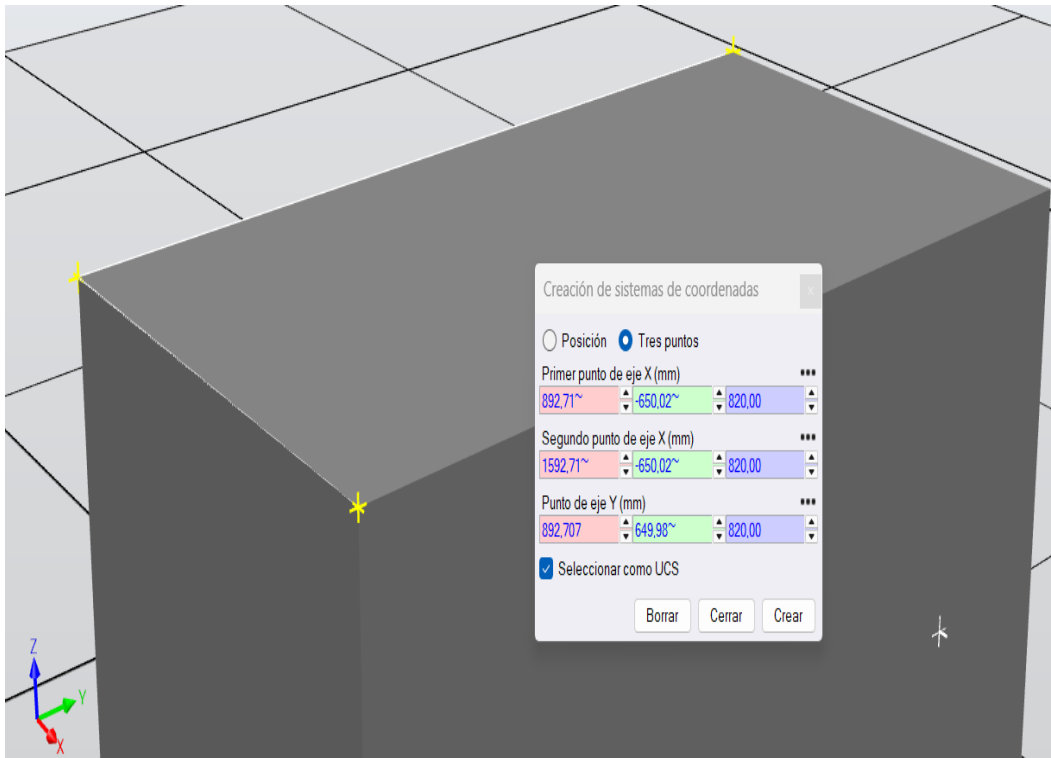
### **Figura 23**

#### *Integración del efector final*



#### **3.4.2 Definición del objeto de trabajo.**

El objeto de trabajo en RobotStudio, cumple un papel fundamental, ya que es el espacio que se define para que el efector final realice las trayectorias sobre un objeto. Para temas prácticos de la simulación se configuró un sólido tetraedro, que simula una mesa como se muestra en la Figura 24, en donde el efector final y las trayectorias se ejecutarán en ese espacio.

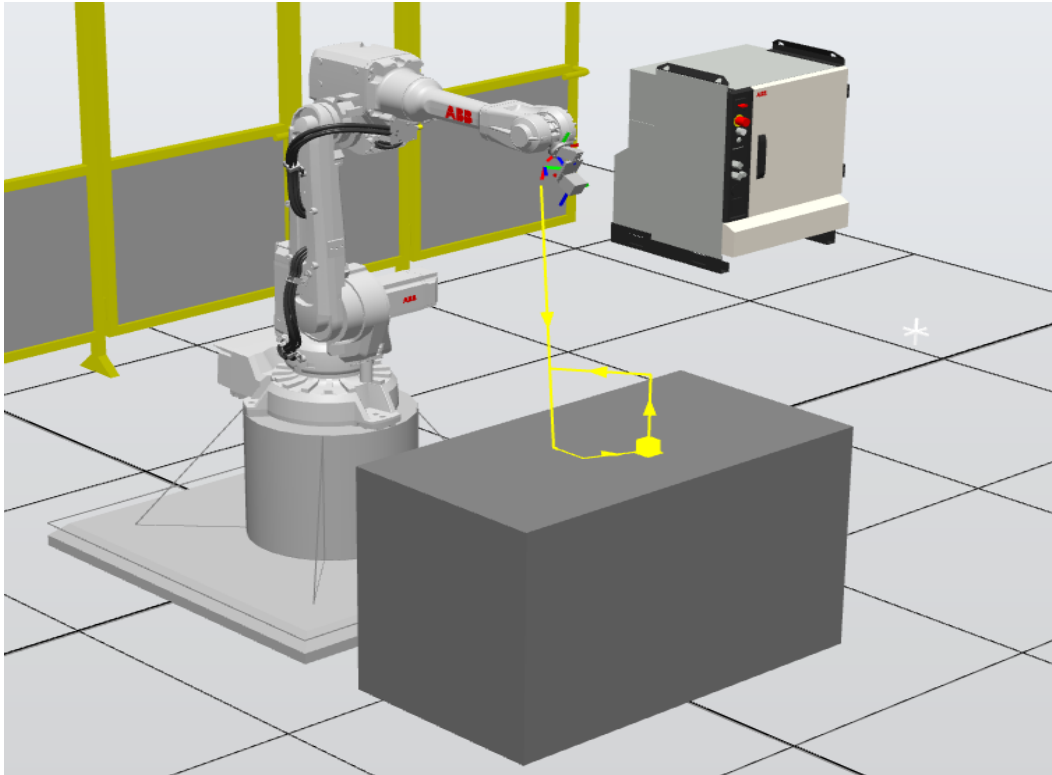
**Figura 24***Creación de objeto de trabajo*

### ***3.4.3 Posprocesamiento de trayectorias.***

Una vez configurado la herramienta y definido el espacio de trabajo, se simulan las trayectorias, las cuales se obtienen mediante un posprocesado realizado en el software Autodesk Fusion 360. En donde a partir de un modelo CAD, se genera el código G correspondiente y se realiza una conversión a código RAPID, en donde obtendremos 2 módulos, en los cuales, uno contiene las trayectorias del objeto, y el otro contiene la ejecución del programa.

**Figura 25**

*Simulación de trayectorias.*

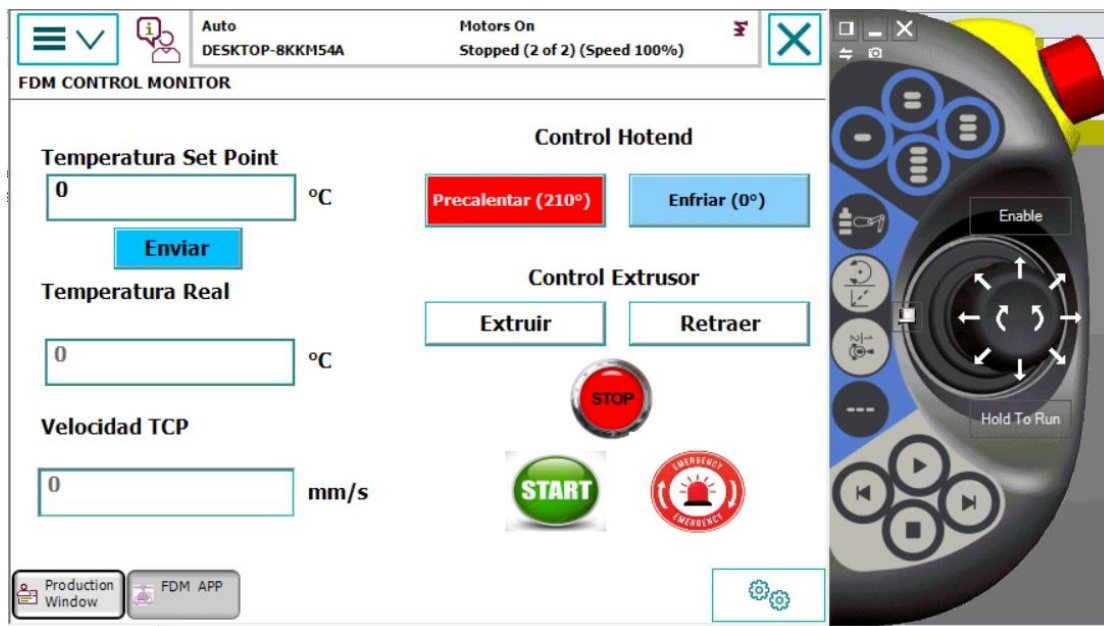


#### ***3.4.4 Creación de Interfaz Hombre-Maquina (HMI).***

Para la conexión y operación del controlador con el sistema embebido, se desarrolló una aplicación HMI integrada en la arquitectura del Flexpendant. El diseño de dicha interfaz priorizo la usabilidad, buscando reducir la complejidad operativa y facilitar el control del proyecto.

**Figura 26**

*Pantalla principal del Flexpendant*



Como se ilustra en la Figura 26, la interfaz está constituida por 8 botones de comandos, un campo de entrada numérica y dos indicadores de monitorización. El campo editable permite al operador visualizar y establecer la temperatura objetiva del calefactor del extrusor. Por otro lado, los indicadores de solo lectura proporcionan retroalimentación en tiempo real de la velocidad de avance del efector final y la temperatura actual del sistema.

Finalmente, en lo relativo a la interfaz de mando, se disponen ocho elementos para la operación manual y ejecución de subrutinas:

1. **START:** Establece el enlace de comunicación con el sistema embebido.
2. **STOP:** Interrumpe el suministro de energía al motor, deteniendo el flujo de extrusión o retracción.
3. **EXTRUIR y RETRAER:** Comandan el sentido de giro del motor para la alimentación o retroceso del filamento. Ambos comandos están condicionados por una restricción lógica de seguridad que inhabilita la acción si la temperatura es inferior a 200°C.

4. **PRECALENTAR y ENFRIAR:** Gestionan perfiles rápidos de temperatura; el primero fija la referencia en 210°C, mientras que el segundo la restablece a temperatura ambiente.
5. **ENVIAR:** Transmite el valor ingresado por el usuario como la nueva consigna (*setpoint*) de control para el extrusor.
6. **PARO DE EMERGENCIA:** Activa una secuencia de parada prioritaria que apaga el motor, deshabilita el calefactor y termina la comunicación entre el controlador y el robot."

### 3.5 Resultados de impresión

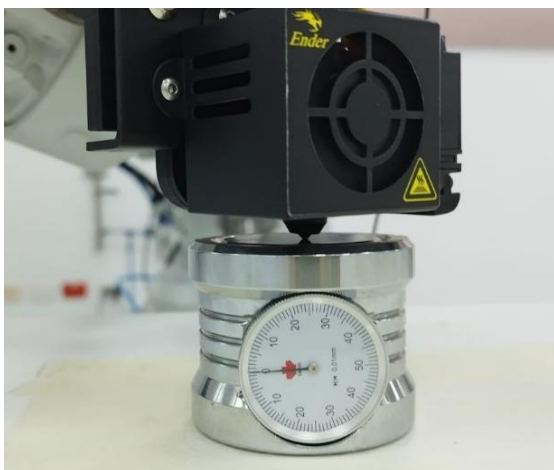
En la presente sección se exponen los resultados obtenidos durante las pruebas de impresión y la validación experimental del sistema integrado. Se detalla el procedimiento de calibración del objeto de trabajo físico. Finalmente, se analizan los parámetros de impresión logrados, tales como la consistencia del flujo de TPU y la precisión dimensional de las piezas fabricadas.

#### 3.5.1 Calibración del objeto de trabajo físico.

Una vez validado la simulación del entorno de impresión en RobotStudio, se procedió a definir el espacio de trabajo físico del robot.

#### Figura 27

*Calibración del objeto de trabajo, mediante reloj comparador*



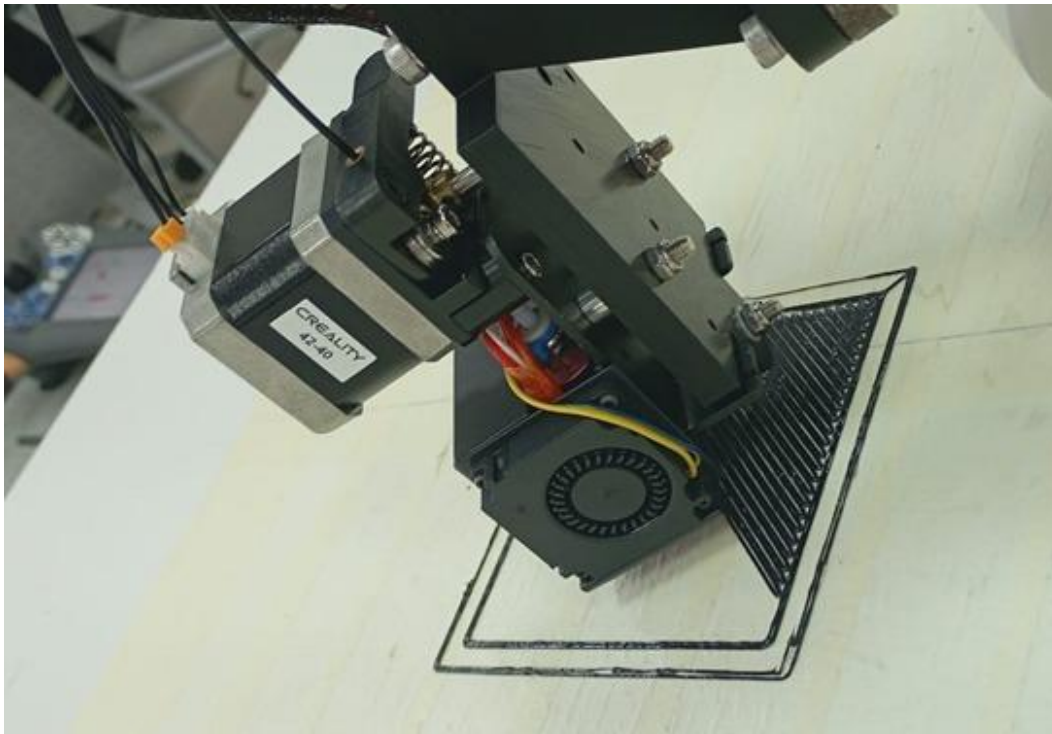
Como se muestra en la Figura 27, el reloj comparador se utilizó como instrumento de medición para establecer la altura de capa empleada en las pruebas de impresión con resolución en milímetros. Adicionalmente, fue empleado para la definición del objeto de trabajo físico del sistema, ubicándolo en tres puntos del perímetro del área de impresión con el fin de definir el plano de trabajo. A partir de estas mediciones, y mediante el uso del FlexPendant del robot ABB, se generó el objeto de trabajo correspondiente, asegurando una correcta referencia espacial entre el robot y la superficie de impresión.

### ***3.5.2 Consistencia del flujo de material.***

Terminado de definir el área de trabajo, se procedió a realizar las primeras pruebas de impresión.

#### **Figura 28**

*Impresión de falda y primera capa.*

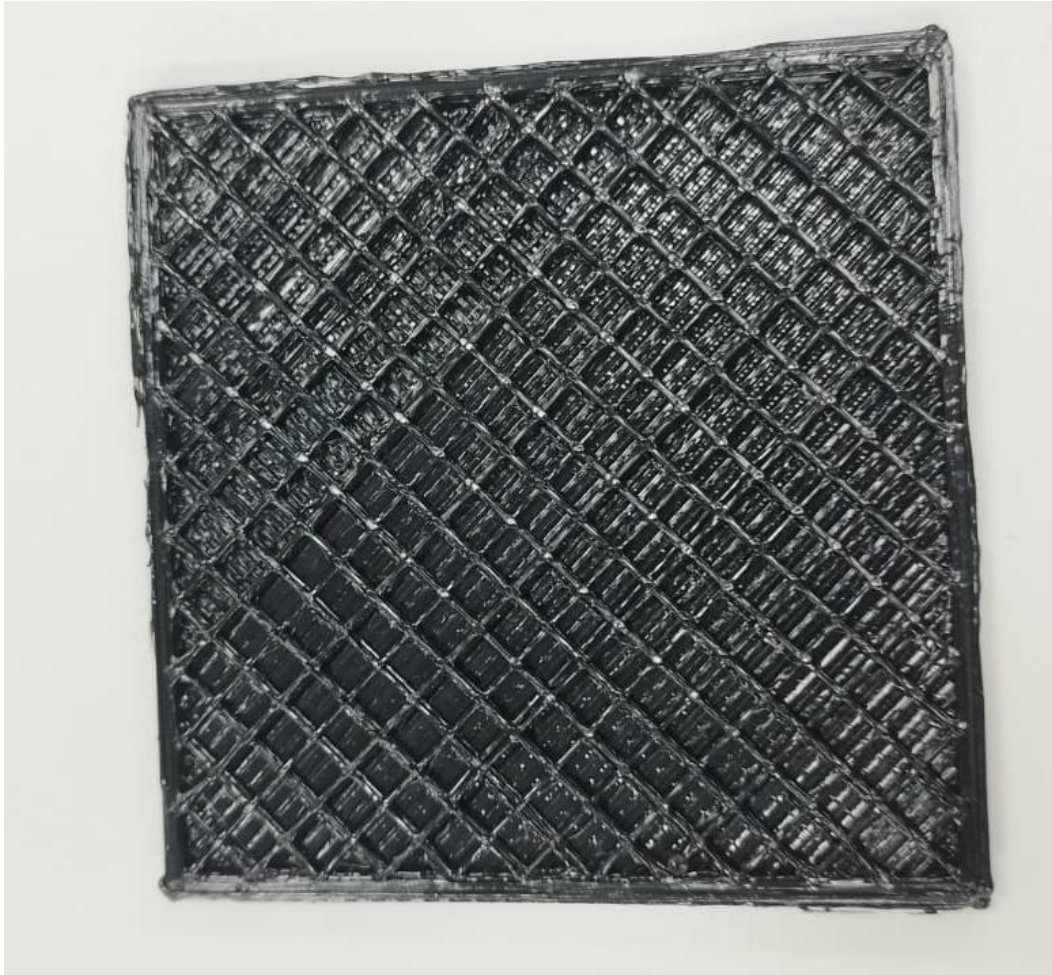


La primera capa en la Figura 28, presenta una adhesión aceptable a la superficie de impresión, sin embargo, se observan ligeras variaciones en el ancho del cordón, lo que sugiere pequeñas inconsistencias en la altura entre la boquilla y superficie a lo largo del recorrido. A

pesar de ello, no se evidencian fallas como levantamiento o discontinuidades. En cuanto a la falda, esta se imprimió de forma continua, aunque con irregularidades en la geometría.

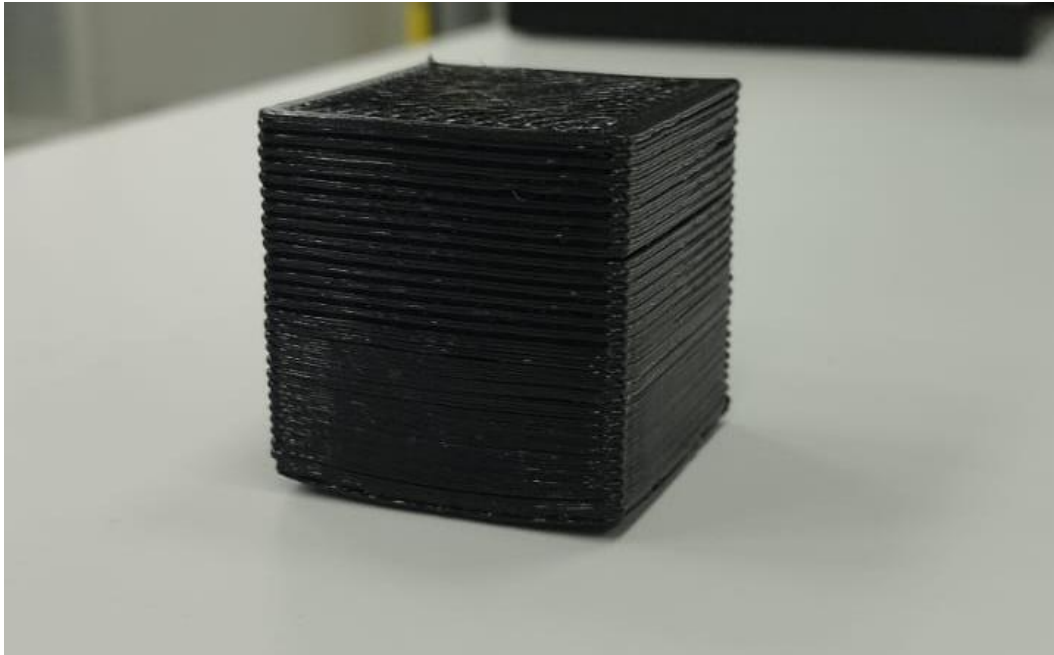
### **Figura 29**

*Impresión de relleno del objeto*



La visualización del relleno en la Figura 29, muestra un patrón consistente y geométricamente correcto. Sin embargo, durante el proceso de deposición se observan variaciones en la igualdad del cordón y pequeñas acumulaciones de material en los cambios de dirección.

Estas irregularidades sugieren limitaciones en la sincronización entre la velocidad del TCP del robot y el caudal de extrusión, así como posibles efectos asociados a aceleraciones y desaceleraciones del manipulador, aunque el relleno cumple su función estructural básica.

**Figura 30***Adhesión entre capas*

En la impresión de un modelo a menor escala, como se observa en la Figura 30, tiene una adhesión entre capas funcional pero no completamente homogénea, la presencia de ligeras separaciones y variaciones en la compactación del material, especialmente en las capas superiores, lo que sugiere fluctuaciones en el caudal de extrusión o en la velocidad del TCP durante el proceso.

En términos de repetibilidad, la geometría general del modelo se mantiene consistente, lo que indica una correcta ejecución de las trayectorias programadas, sin embargo, se observa acumulación en los bordes y en la superposición de capas, las cuales afectan la calidad final, respecto a la precisión dimensional, el modelo conserva su forma básica, pero presenta desviaciones y una definición limitada de las aristas.

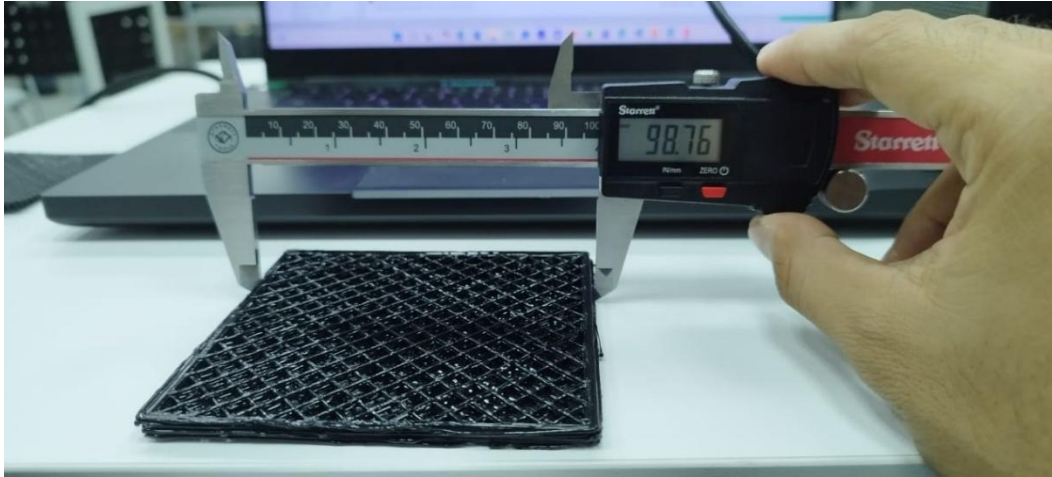
**3.5.3 Precisión de las piezas.**

La validación de la precisión del sistema se realizó mediante la comparación dimensional entre el modelo digital diseñado en Autodesk Fusion 360 y la pieza física manufacturada. Como se observa en la Figura 31 en las mediciones experimentales, una pieza

con una dimensión nominal de 100 mm resultó en una medida real de 98.76 mm, lo que representa un error absoluto de 1.24 mm y un error relativo del 1.24%.

### Figura 31

*Medición experimental de la pieza manufacturada*



La discrepancia observada sugiere la presencia de errores acumulativos durante el proceso de impresión, asociados principalmente a variaciones en la calibración del sistema, contracción del material durante el enfriamiento y limitaciones en la sincronización entre la trayectoria del robot y el caudal de extrusión.

## 3.6 Análisis de costo

En esta sección se señalarán y analizará los diferentes costos aproximados para el desarrollo del proyecto actual.

### 3.6.1 Costo de ingeniería.

**Tabla 8**

*Costo de ingeniería*

| Componente   | Precio Final |
|--------------|--------------|
| Mano de Obra | \$3000       |
| Total        | \$3000       |

### 3.6.2 Piezas mecánicas.

En la Tabla 9 se muestra el precio total de los componentes necesarios para el montaje del extrusor, el filamento TPU y los circuitos eléctricos en el brazo robótico. El precio unitario por montaje de este proyecto es de \$43.20.

**Tabla 9**

*Costos de los componentes del diseño mecánico*

| Componente             | Unidades | Precio Unitario | Precio Final |
|------------------------|----------|-----------------|--------------|
| Acople Extrusor        | 1        | \$5             | \$5          |
| Acople Brida           | 1        | \$5             | \$5          |
| Acople                 | 1        | \$15            | \$15         |
| Componentes Eléctricos |          |                 |              |
| Guía de Cableado       | 1        | \$1             | \$1          |
| Guía de Filamento      | 2        | \$1.10          | \$2.20       |
| Acople Carrete         | 1        | \$10            | \$10         |
| Filamento              |          |                 |              |
| Tapa Acople Carrete    | 1        | \$5             | \$5          |
| Total                  |          |                 | \$43.20      |

### 3.6.3 Componentes electrónicos.

Por otro lado, en la Tabla 10 se observan los precios de los componentes empleados para el circuito eléctrico del prototipo. El valor unitario para el apartado electrónico del sistema llega a un total de \$89.52.

**Tabla 10***Costos de componentes electrónicos*

| Componente                    | Unidades     | Precio Unitario | Precio Total   |
|-------------------------------|--------------|-----------------|----------------|
| Borneras de 2 Pines           | 2            | \$0.37          | \$0.74         |
| Conectores JST 2 Pines        | 2            | \$0.35          | \$0.70         |
| Conector JST de 4 Pines       | 1            | \$0.7           | \$0.70         |
| Driver A4988                  | 1            | \$6.70          | \$6.70         |
| Conectores Header-Female x 10 | 3            | \$0.25          | \$0.75         |
| Modulo LM2596                 | 1            | \$2.50          | \$2.50         |
| Portafusibles 10A             | 1            | \$0.50          | \$0.50         |
| Fusible de 10A                | 1            | \$0.20          | \$0.20         |
| Resistencias de 10k Ohm       | 2            | \$0.13          | \$0.26         |
| Resistencias de 1k Ohm        | 2            | \$0.22          | \$0.44         |
| Resistencia de 100 Ohm        | 1            | \$0.2           | \$0.20         |
| Resistencia de 100k Ohm       | 1            | \$0.23          | \$0.23         |
| Capacitor 100uF (35-50V)      | 1            | \$0.50          | \$0.50         |
| BJT 2N2222A                   | 1            | \$0.44          | \$0.44         |
| Mosfet P55NF06                | 1            | \$1.00          | \$1.00         |
| Fuente Conmutada 24V-10A      | 1            | \$14.00         | \$14.00        |
| PCB                           | 1            | \$9.00          | \$9.00         |
| Cable Concéntrico 3x14        | 1            | \$13.09         | \$13.09        |
| Cable 16AWG                   | 1            | \$2.50          | \$2.50         |
| Enchufe Macho 3 Patas         | 1            | \$1.65          | \$1.65         |
| Arduino Mega                  | 1            | \$15.00         | \$15.00        |
| Modulo Shield Ethernet W5100  | 1            | \$15.00         | \$15.00        |
| Poste 25x33mm Bronce          | 6            | \$0.57          | \$3.42         |
|                               | <b>Total</b> |                 | <b>\$89.52</b> |

### 3.6.4 Materiales.

En la Tabla 11, se evidencian el costo de los materiales usados en la construcción del proyecto, como el extrusor de marca Creality, el cual es la pieza principal del proyecto, además el uso de amarras y espirales para tener una mejor presentación del prototipo al cliente.

**Table 11**

*Costo de materiales*

| Componente                 | Unidades | Precio Unitario | Precio Total |
|----------------------------|----------|-----------------|--------------|
| Extrusor Creality Ender 3V | 1        | \$57.50         | \$57.50      |
| Amarras x100               | 1        | \$2.10          | \$2.10       |
| Espirales para cable       | 1        | \$7             | \$7          |
| Total                      |          |                 | \$66.60      |

El precio final de los materiales empleados para el levantamiento del proyecto es de \$199.32. A este valor, se le debe añadir la mano de obra realizada por cada estudiante que en total son \$3000, este valor representa al diseño de las piezas, ensamble mecánico, diseño de PCB, integración de componentes electrónicos y programación. En total la inversión para el desarrollo del proyecto mencionado en las secciones anteriores asciende a \$3199.32.

### 3.7 Limitaciones

Se identificaron limitaciones en la sincronización del sistema. Uno de ellos es el procesamiento de datos, el microcontrolador Arduino Mega presenta restricciones ante ráfagas de información de alta frecuencia. El envío masivo de datos en intervalos reducidos provoca un desbordamiento del búfer de recepción serial, ocasionando pérdida de paquetes y, consecuentemente, discontinuidad en la deposición del material.

Por otro lado, se observó una restricción mecánica del sistema de alimentación. La tracción ejercida por el motor del extrusor y las guías del filamento generan una tensión excesiva en el mismo, lo que impide su flujo hacia la boquilla. Este fenómeno genera una obstrucción afectando al extrusor y al proceso de impresión.

## **Capítulo 4**

## 4. Conclusiones y Recomendaciones

El presente capítulo sintetiza los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, evaluando el cumplimiento de los objetivos planteados y el desempeño de la solución propuesta. A partir de análisis del diseño, la implementación y las pruebas realizadas, se formulan conclusiones que reflejan el alcance del trabajo.

Asimismo, se presentan recomendaciones orientadas a la mejora del sistema desarrollado, considerando las limitaciones identificadas y las oportunidades de aplicación futura tanto en el ámbito académico como en posibles entornos industriales.

### 4.1 Conclusiones

- El diseño del efector final FDM para el robot ABB IRB 2600 permitió integrar de manera efectiva el proceso de manufactura aditiva al sistema robótico existente. El cumplimiento de los requerimientos mecánicos, eléctricos y de control, evidenció que el sistema propuesto es técnicamente viable, habilitando la impresión 3D asistida por robot como una alternativa funcional.
- El análisis de los requerimientos funcionales, mecánicos y eléctricos permitió definir criterios de diseño que aseguraron la estabilidad estructural, la correcta orientación del extrusor y una integración segura con el manipulador. Estos criterios se reflejaron en un efector final rígido, compacto y alineado con el TCP del robot.
- La modelación CAD y la simulación del sistema en RobotStudio permitieron validar el comportamiento geométrico y cinemático del efector final antes de su implementación física. Los resultados obtenidos demostraron que el sistema puede ejecutar trayectorias de impresión sin colisiones ni interferencias, lo que valida que el diseño propuesto es compatible con el espacio de trabajo del ABB IRB 2600.
- La implementación de la comunicación TCP/IP entre el controlador ABB IRC5 y el microcontrolador permitió establecer una arquitectura de control estable. A través de

esta comunicación se logró sincronizar el movimiento del robot con los comandos de extrusión y control térmico, evidenciando que el sistema responde de manera adecuada a las instrucciones enviadas durante el proceso de impresión.

- El sistema de control de temperatura basado en un controlador PID permitió mantener el hotend dentro del rango térmico requerido para la extrusión del material. Si bien se presentaron pequeñas variaciones durante los cambios de temperatura, el comportamiento general del sistema fue estable, lo que contribuyó a una extrusión continua y a la repetibilidad del proceso de manufactura aditiva.
- Las pruebas experimentales realizadas sobre el sistema integrado evidenciaron que el efector final permite realizar procesos de impresión 3D con una precisión aceptable y una repetibilidad consistente. Aunque se identificaron desviaciones dimensionales y variaciones en el cordón de extrusión, los resultados obtenidos demuestran que el sistema cumple con el tercer objetivo específico y sienta las bases para futuras mejoras en la impresión 3D robótica.

## 4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar pruebas adicionales utilizando diferentes materiales termoplásticos, como PLA, ABS o materiales compuestos, con el fin de evaluar el comportamiento del efector final bajo distintas condiciones térmicas, así como analizar la calidad final de las piezas impresas.
- Se sugiere optimizar el control de temperatura mediante técnicas avanzadas de control, como control adaptativo o PID autoajustable, con el objetivo de reducir las oscilaciones térmicas y mejorar la estabilidad del proceso de extrusión durante impresiones prolongadas.

- Para trabajos futuros, se recomienda profundizar en el desarrollo de trayectorias no planares dentro del entorno de RobotStudio, aprovechando la libertad de movimiento del robot industrial para mejorar la adhesión entre capas y reducir la necesidad de estructuras de soporte.
- Es recomendable realizar un análisis dinámico más detallado del efector final, evaluando vibraciones, esfuerzos mecánicos y desviaciones del TCP a mayores velocidades de impresión, lo que permitiría ampliar el rango operativo del sistema sin comprometer la calidad del proceso.
- Finalmente, se sugiere evaluar la implementación del sistema en entornos industriales reales o en celdas robóticas completas, con el objetivo de analizar su desempeño bajo condiciones de operación prolongadas. Esto permitiría validar su escalabilidad, robustez y potencial aplicación en procesos productivos de mayor complejidad.

## Referencias

- [1] Grand View Research, “Additive Manufacturing Market Size, Share & Trends Analysis Report (2024 - 2030),” Grand View Research, San Francisco, CA, Rep. GVR-4-68038-828-0, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/additive-manufacturing-market>. [Accedido: 14-dic-2025].
- [2] S. Phapale, “Industrial 3D Printing Market Size, Share and Forecast 2032,” Credence Research Inc., Rep., 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.credenceresearch.com/report/industrial-3d-printing-market>. [Accedido: 15-dic-2025].
- [3] I. Gibson, D. W. Rosen y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2a ed. Cham, Suiza: Springer, 2021.
- [4] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen y D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Compos. Part B: Eng.*, vol. 143, pp. 172–196, jun. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [5] ABB Robotics, “IRB 2600 Industrial Robot Product Specification,” ABB AB, Västerås, Suecia, Hoja de datos, 2022. [En línea]. Disponible: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-2600>.
- [6] P. Urhal, A. Weightman, C. Diver y P. J. Da Silva Bartolo, “Robot assisted additive manufacturing: A review,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 59, pp. 335–345, oct. 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2019.05.005.

- [7] A. Alhijaily *et al.*, “Teams of robots in additive manufacturing: A review,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 45, no. 1, pp. 1–12, 2023, doi: 10.1080/17452759.2022.2162929.
- [8] A. Zotti, T. Paduano, F. Napolitano, S. Zuppolini, M. Zarrelli y A. Borriello, “Fused Deposition Modeling of Polymer Composites: Development, Properties and Applications,” *Polymers*, vol. 17, no. 8, art. no. 1054, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/8/1054>. [Accedido: 13-dic-2025].
- [9] Grilon3, “Temperatura y velocidad de impresión en PLA y ABS,” Grilon3 Blog. [En línea]. Disponible: <https://grilon3.com.ar/temperatura-y-velocidad-de-impresion-en-pla-y-abs/>. [Accedido: 15-dic-2025].
- [10] Academia Hellbot, “Parámetros personalizados de impresión,” Academia Hellbot. [En línea]. Disponible: <https://academia.hellbot.xyz/temas/parametros-personalizados-de-impresion/>. [Accedido: 04-ene-2026].
- [11] Nexovirtual, “Domina la Impresión 3D FDM: Parámetros Clave para una Impresión Perfecta,” CADEMS. [En línea]. Disponible: <https://cadems.es/domina-la-impresion-3d-fdm-parametros-clave-para-una-impresion-perfecta/>. [Accedido: 04-ene-2026].
- [12] Z. Shao y Q. Cui, “Non-Planar 3d Printing and Path Compensation by Dual Robot System Based on Distance Field and Dynamic Simulation,” SSRN, documento de trabajo, 2024. [En línea]. Disponible: <https://ssrn.com/abstract=4703858>. [Accedido: 04-ene-2026].
- [13] D. Acierno y A. Patti, “Fused Deposition Modelling (FDM) of Thermoplastic-Based Filaments: Process and Rheological Properties—An Overview,” *Materials*, vol. 16, no. 24, art. no. 7664, dic. 2023, doi: 10.3390/ma16247664.

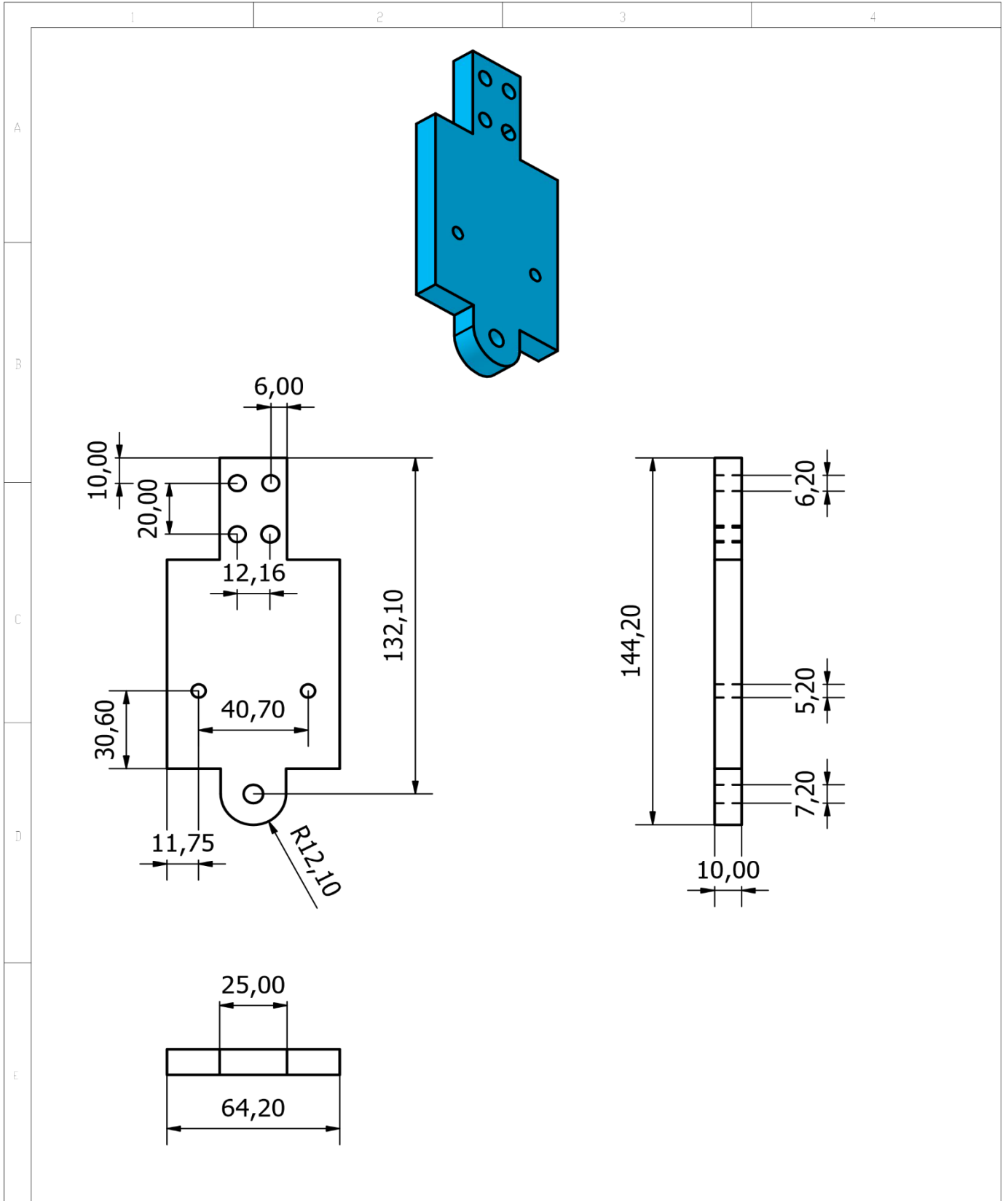
- [14] A. V. Shembekar, Y. J. Yoon, A. Kanyuck y S. K. Gupta, “Generating Robot Trajectories for Conformal Three-Dimensional Printing Using Nonplanar Layers,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 19, no. 3, art. no. 031011, sep. 2019, doi: 10.1115/1.4043013.
- [15] F. Rosoux, H. Appeldoorn, D. Garray y E. Beeckman, “Generation of large scale robotic 3D printing trajectories and optimization of the quality of pieces,” *Comput. Methods Mater. Sci.*, vol. 23, no. 1, pp. 35-41, 2023, doi: 10.7494/cmms.2023.1.0794.
- [16] M. Karpiński y Ł. Wojciechowski, “Influence of End-Effector Mass Properties on the Path Following Accuracy of an Industrial Robot,” *Machines*, vol. 11, no. 2, art. no. 222, feb. 2023, doi: 10.3390/machines11020222.
- [17] A. Klimchik, A. Pashkevich y D. Chablat, “CAD-based stiffness modeling of robotic manipulators with passive joints,” en *Proc. 2010 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, Anchorage, AK, EE. UU., 2010, pp. 1686–1691, doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509301.
- [18] A. Pashkevich, D. Chablat y P. Wenger, “Stiffness analysis of overconstrained parallel manipulators,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 40, no. 6, pp. 665–682, jun. 2005.
- [19] S. A. A. Akbari Mousavi y R. Miresmaeili, “Experimental determination of weld pool geometry for GTAW of HP-40 steel using fuzzy logic,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 203, no. 1-3, pp. 186-191, jul. 2008.
- [20] J. N. Pires, A. Loureiro y G. Bolmsjö, *Welding Robots: Technology, System Issues and Application*. Londres, R.U.: Springer, 2006.

- [21] P. Danielis, J. Skodzik, V. Altmann, E. B. Schweissguth, F. Golatowski y D. Timmermann, “SDN-based Real-Time Communication in Industrial Ethernet Networks,” en *Proc. 2015 IEEE 20th Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. (ETFA)*, Luxemburgo, 2015, pp. 1–8, doi: 10.1109/ETFA.2015.7301402.
- [22] E. Tapia Fernández y L. Sastoque Pinilla, “Conectividad de alta velocidad para la obtención de información en plantas hiperconectadas,” *Interempresas: Automatización en la Industria 4.0*, nov. 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.interempresas.net/Robotica/497435-Conectividad-de-alta-velocidad-para-la-obtencion-de-informacion-en-plantas-hiperconectadas.html>. [Accedido: 04-ene-2026].
- [23] Hilscher Gesellschaft für Systemautomation mbH, “TCP/IP: Technology and Advantages in Industrial Automation,” Hilscher Knowledge Base, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.hilscher.com/na/service-support/glossary/tcp-ip>. [Accedido: 04-ene-2026].
- [24] ABB Robotics, “Product specification - IRB 2600,” ABB AB, Västerås, Suecia, Doc. ID 3HAC035959-001, Rev. V, 2018.
- [25] Prusa Research, “Original Prusa i3 MK3S+ 3D Printer,” Hoja de datos, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-kit/>.
- [26] Stratasys, “F900 Production 3D Printer System Specifications,” Stratasys, Eden Prairie, MN, EE. UU., Hoja de datos, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.stratasys.com/en/3d-printers/printer-catalog/fdm-printers/f900-printer/>.

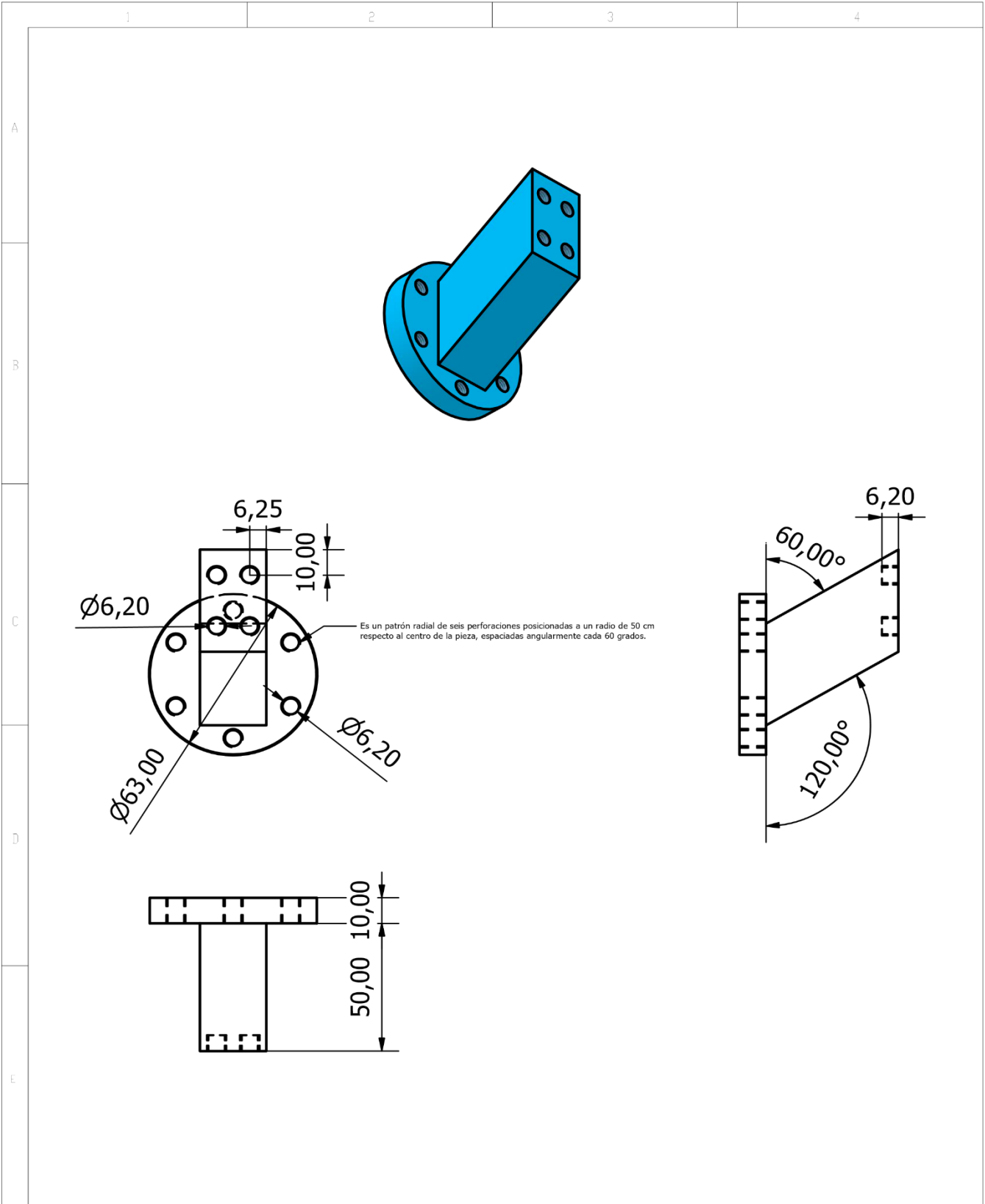
- [27] D. Liu, Z. Zhang, X. Zhang y Z. Chen, “3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 405, art. no. 133364, nov. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133364.
- [28] M. Chaturvedi, “Wire arc additive manufacturing: Review on recent findings and challenges in industrial applications and materials characterization,” *Metals*, vol. 11, no. 6, art. no. 939, jun. 2021, doi: 10.3390/met11060939.
- [29] F. Lambiase, “A state of the art review of wire arc additive manufacturing (WAAM)—Part 1: Process fundamentals, parameters and materials,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 138, pp. 4965–4993, 2025, doi: 10.1007/s00170-025-15781-8.

## **Apéndices**

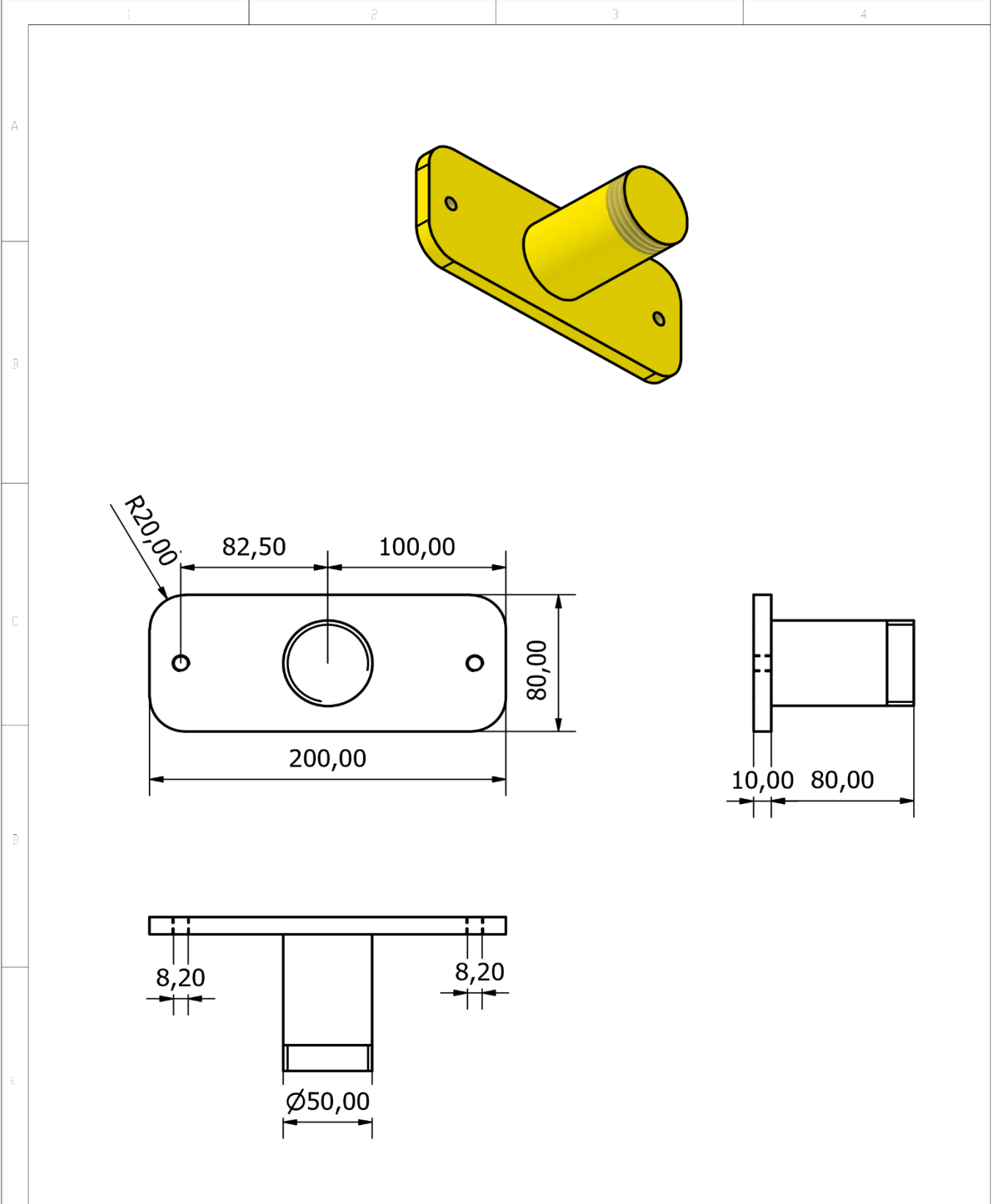
**Apéndice A –**  
**Planos Mecánicos**



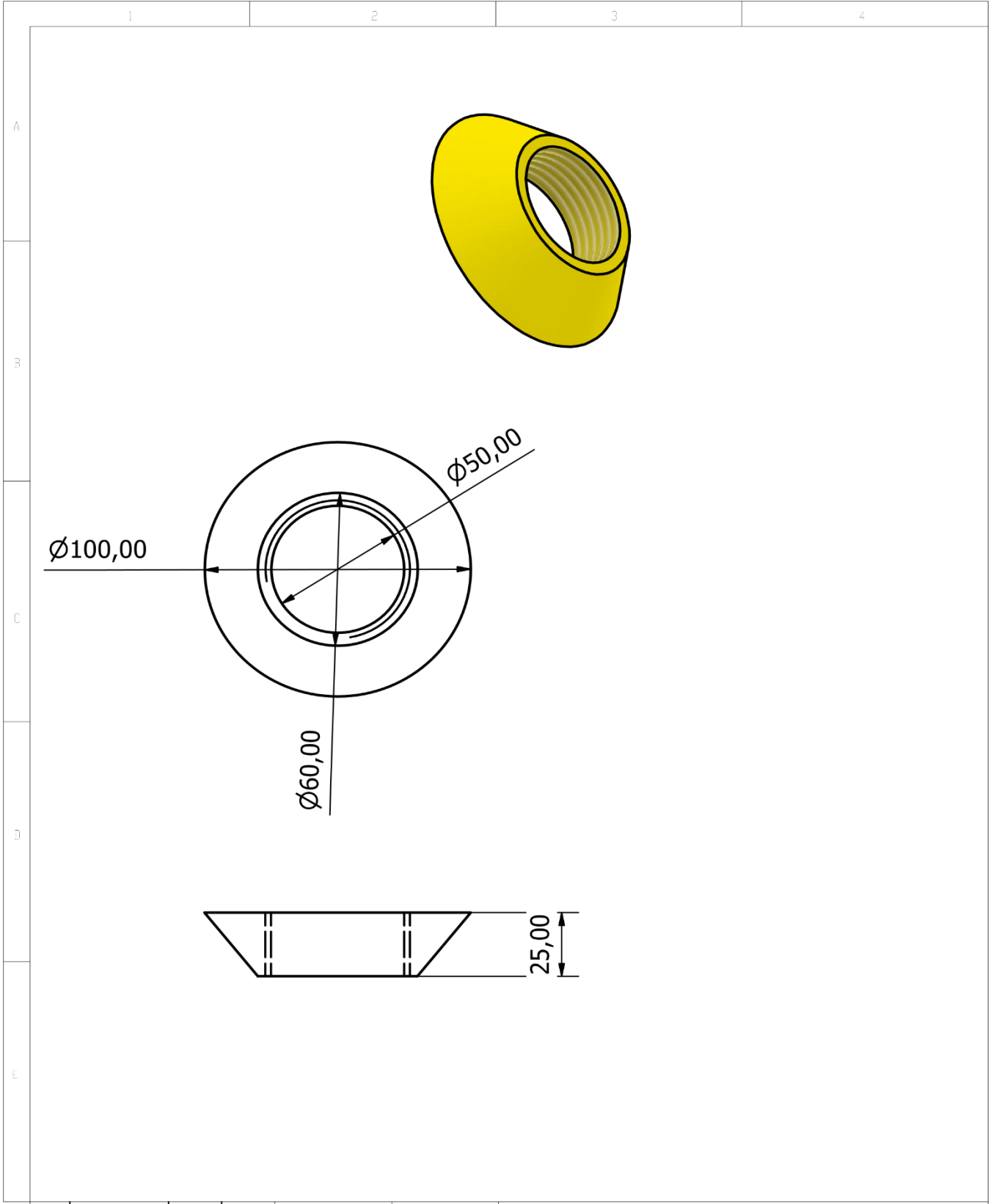
|              |              |       |        |             |              |                   |        |
|--------------|--------------|-------|--------|-------------|--------------|-------------------|--------|
|              |              |       |        | TOLERANCIAS | PESO         | MATERIALES        |        |
|              |              |       |        |             | 0.044 Kg     | PLA               |        |
|              |              |       |        | FECHA       | NOMBRE       | DENOMINACIÓN      | ESCALA |
|              |              |       |        | DIB.        | 24/01/26     | Adrián Pardo      | 1:2    |
|              |              |       |        | REV.        |              |                   |        |
|              |              |       |        | APROB.      |              |                   |        |
|              |              |       |        |             | <b>ESPOL</b> | NÚMERO DEL DIBUJO | 1      |
| EDI-<br>C16N | MODIFICACIÓN | FECHA | NOMBRE |             |              | SUSTITUYE A:      |        |



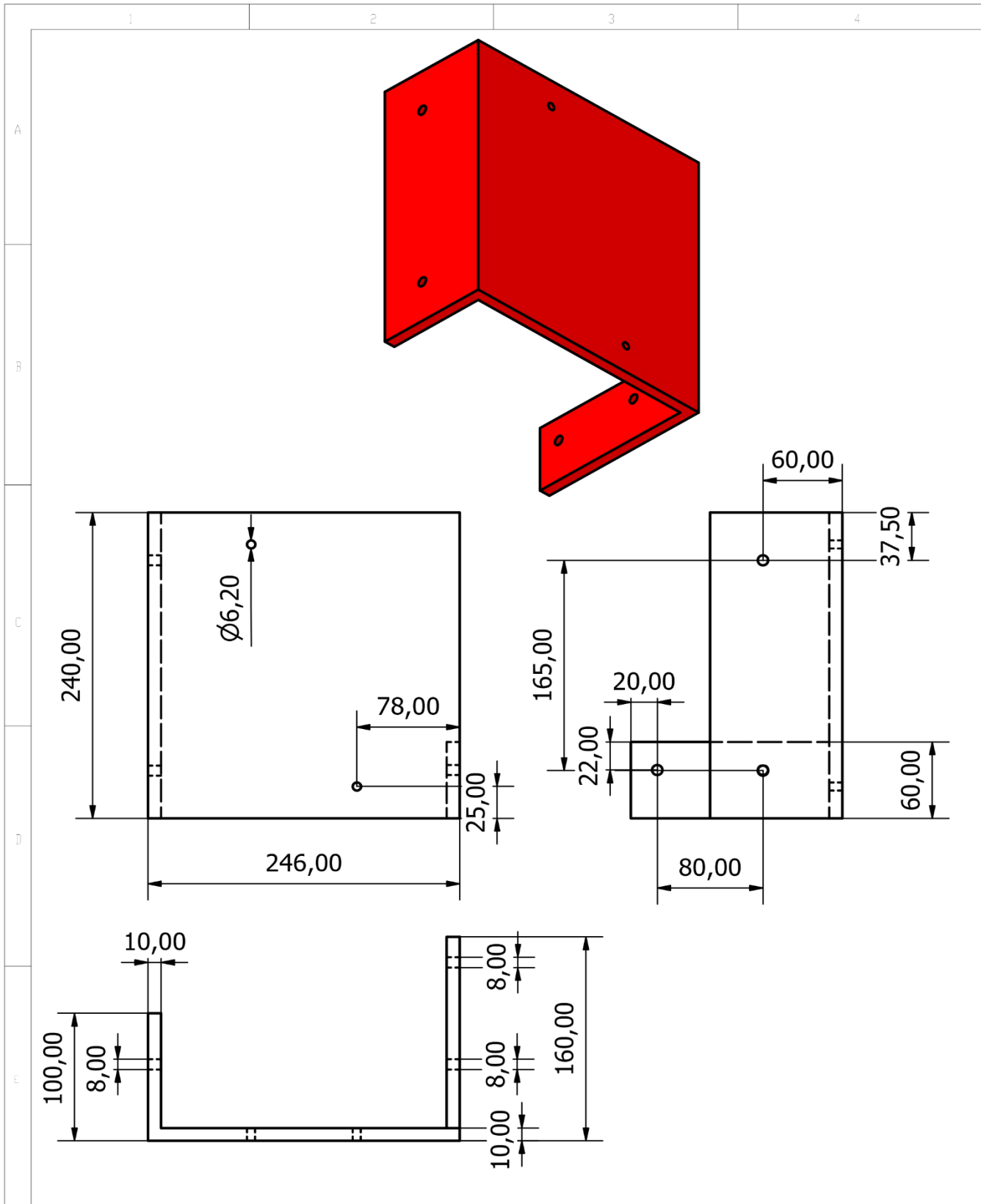
|          |              |       |        |               |              |                                |        |
|----------|--------------|-------|--------|---------------|--------------|--------------------------------|--------|
|          |              |       |        | TOLERANCIAS   | PESO         | MATERIALES                     |        |
|          |              |       |        |               | 0.049 Kg     | PLA                            |        |
|          |              |       |        | FECHA         | NOMBRE       | DENOMINACIÓN                   | ESCALA |
|          |              |       |        | DIB. 24/01/26 | Adrián Pardo | Efecetor Final Parte Posterior | 1:2    |
|          |              |       |        | REV.          |              |                                |        |
|          |              |       |        | APROB.        |              |                                |        |
|          |              |       |        |               | ESPOL        | NÚMERO DEL DIBUJO              |        |
|          |              |       |        |               |              | 2                              |        |
|          |              |       |        |               |              | SUSTITUYE A:                   |        |
| EDL-CT6N | MODIFICACIÓN | FECHA | NOMBRE |               |              |                                |        |



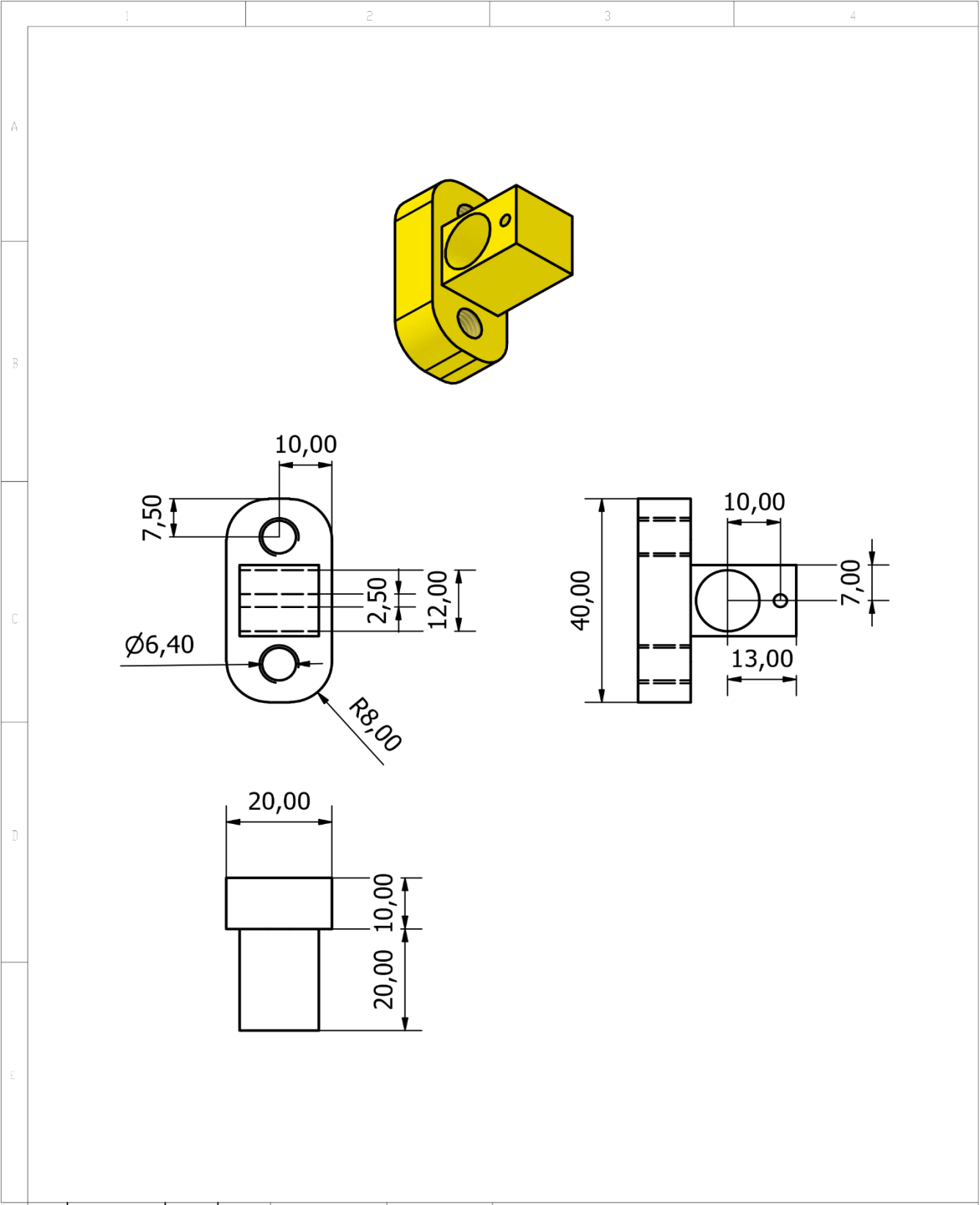
|         |              |       |        |             |          |                   |        |
|---------|--------------|-------|--------|-------------|----------|-------------------|--------|
|         |              |       |        | TOLERANCIAS | PESO     | MATERIALES        |        |
|         |              |       |        |             | 0.185 Kg | PLA               |        |
|         |              |       |        | FECHA       | NOMBRE   | DENOMINACIÓN      | ESCALA |
|         |              |       |        | DIB.        | 24/01/26 | Adrián Pardo      | 1:3    |
|         |              |       |        | REV.        |          |                   |        |
|         |              |       |        | APROB.      |          |                   |        |
|         |              |       |        |             |          | NÚMERO DEL DIBUJO |        |
|         |              |       |        |             |          | 3                 |        |
|         |              |       |        |             |          | SUSTITUYE A:      |        |
| EDICIÓN | MODIFICACIÓN | FECHA | NOMBRE | ESPOL       |          |                   |        |



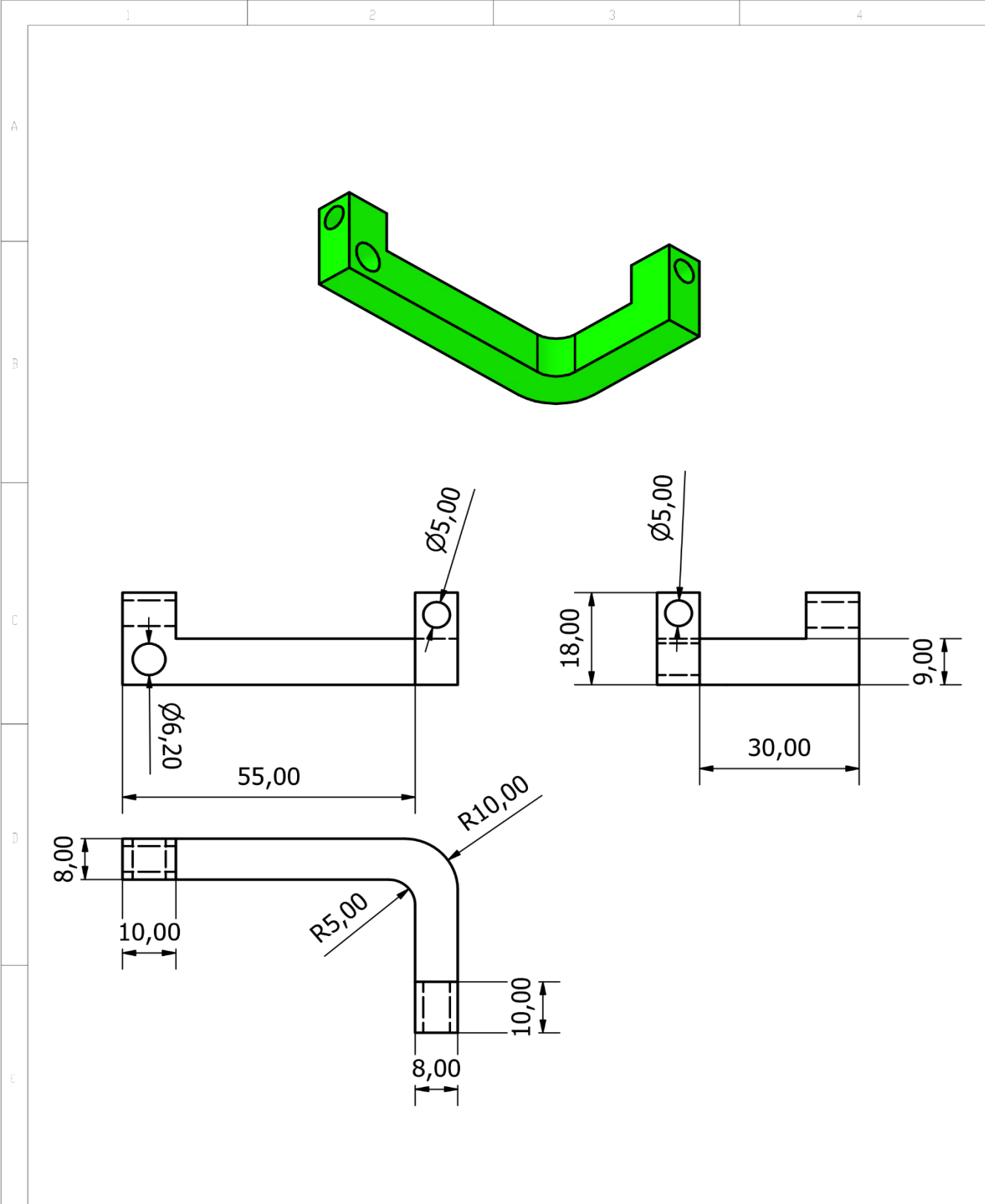
|              |              |       |        |             |         |                   |        |              |     |
|--------------|--------------|-------|--------|-------------|---------|-------------------|--------|--------------|-----|
|              |              |       |        | TOLERANCIAS | PESO    | MATERIALES        |        |              |     |
|              |              |       |        |             | 0.05 Kg | PLA               |        |              |     |
|              |              |       |        |             |         | DENOMINACIÓN      | ESCALA |              |     |
|              |              |       |        | DIB.        | FECHA   |                   |        | Tapa Carrete | 1:2 |
|              |              |       |        | REV.        |         |                   |        |              |     |
|              |              |       |        | APROB.      |         |                   |        |              |     |
|              |              |       |        |             | ESPOL   | NÚMERO DEL DIBUJO |        |              |     |
| EDI-<br>CIÓN | MODIFICACIÓN | FECHA | NOMBRE |             |         | 4                 |        | SUSTITUYE A: |     |



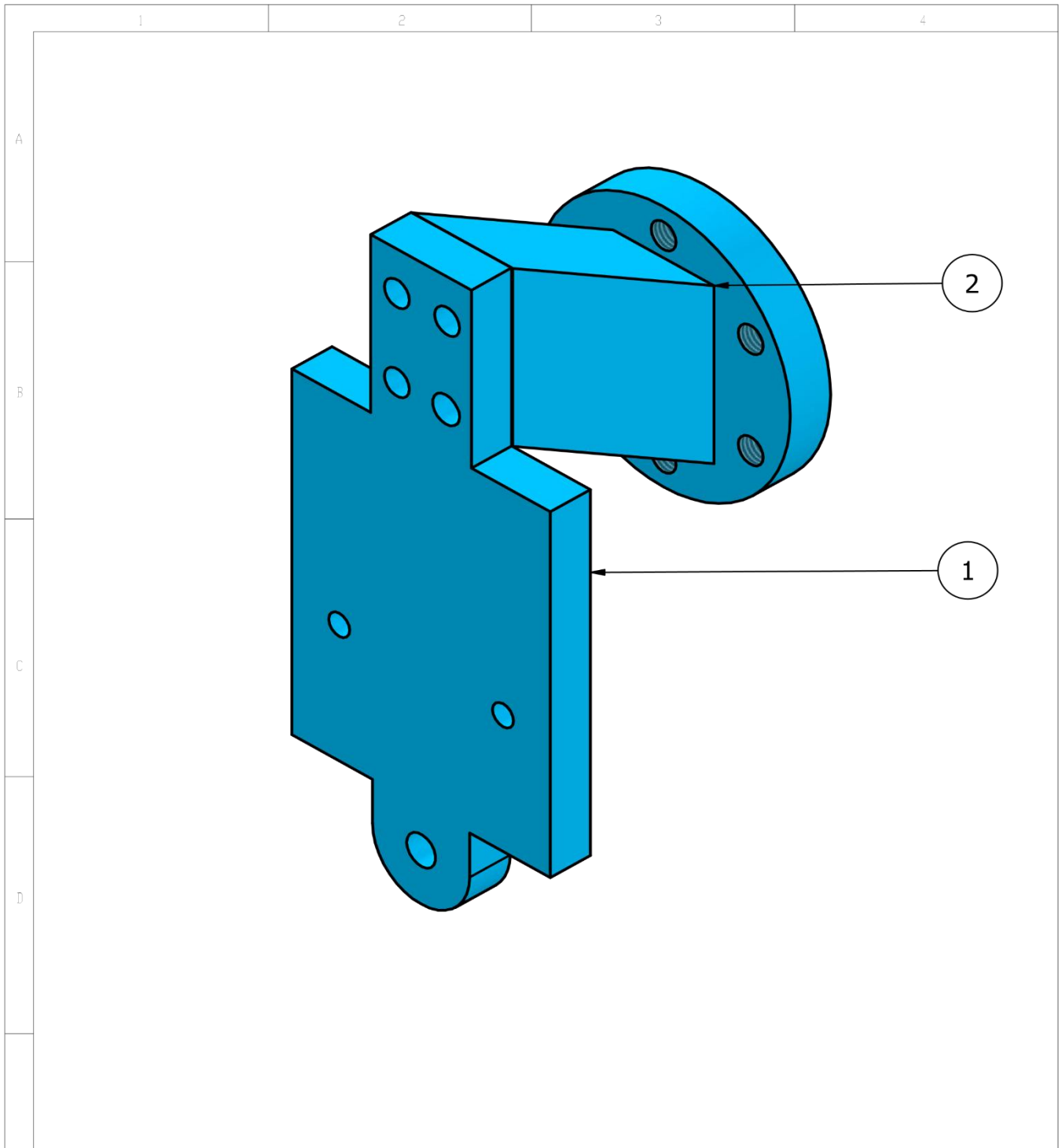
|              |              |       |        |               |              |                   |        |
|--------------|--------------|-------|--------|---------------|--------------|-------------------|--------|
|              |              |       |        | TOLERANCIAS   | PESO         | MATERIALES        |        |
|              |              |       |        |               | 0.548 Kg     | PLA               |        |
|              |              |       |        | FECHA         | NOMBRE       | DENOMINACIÓN      | ESCALA |
|              |              |       |        | DIB. 24/01/26 | Adrián Pardo | Acople Circuito   | 1:4    |
|              |              |       |        | REV.          |              |                   |        |
|              |              |       |        | APROB.        |              |                   |        |
|              |              |       |        |               | <b>ESPOL</b> | NÚMERO DEL DIBUJO | 5      |
|              |              |       |        |               |              | SUSTITUYE A:      |        |
| EDI-<br>CIÓN | MODIFICACIÓN | FECHA | NOMBRE |               |              |                   |        |



|         |              |       |        |             |          |                      |        |
|---------|--------------|-------|--------|-------------|----------|----------------------|--------|
|         |              |       |        | TOLERANCIAS | PESO     | MATERIALES           |        |
|         |              |       |        |             | 0.007 Kg | PLA                  |        |
|         |              |       |        | FECHA       | NOMBRE   | DENOMINACIÓN         | ESCALA |
|         |              |       |        | DIB.        | 24/01/26 | Adrián Pardo         | 1:1    |
|         |              |       |        | REV.        |          | Acople Guía Cableado |        |
|         |              |       |        | APROB.      |          |                      |        |
|         |              |       |        |             |          | NÚMERO DEL DIBUJO    |        |
|         |              |       |        |             |          | 6                    |        |
|         |              |       |        |             |          | SUSTITUYE A:         |        |
| EDICIÓN | MODIFICACIÓN | FECHA | NOMBRE |             | ESPOL    |                      |        |

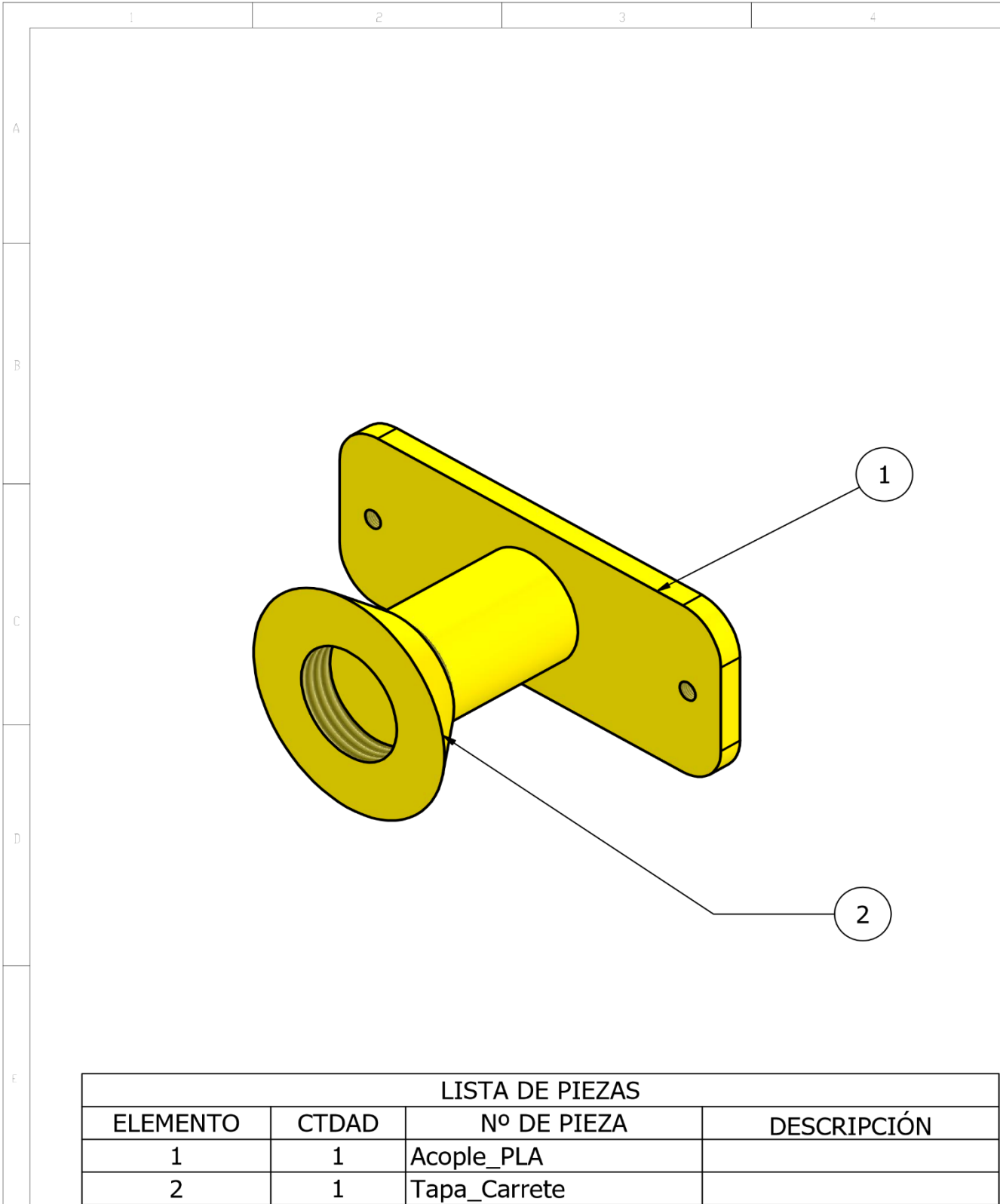


|         |              |       |        |             |          |                   |        |
|---------|--------------|-------|--------|-------------|----------|-------------------|--------|
|         |              |       |        | TOLERANCIAS | PESO     | MATERIALES        |        |
|         |              |       |        |             | 0.006 Kg | PLA               |        |
|         |              |       |        | FECHA       | NOMBRE   | DENOMINACIÓN      | ESCALA |
|         |              |       |        | DIB.        | 24/01/26 | Adrián Pardo      | 1:1    |
|         |              |       |        | REV.        |          |                   |        |
|         |              |       |        | APROB.      |          |                   |        |
|         |              |       |        |             |          | NÚMERO DEL DIBUJO |        |
|         |              |       |        |             |          | 7                 |        |
|         |              |       |        |             |          | SUSTITUYE A:      |        |
| EDICIÓN | MODIFICACIÓN | FECHA | NOMBRE | ESPOL       |          |                   |        |



| LISTA DE PIEZAS |       |                       |             |
|-----------------|-------|-----------------------|-------------|
| ELEMENTO        | CTDAD | Nº DE PIEZA           | DESCRIPCIÓN |
| 1               | 1     | Acople_Extractor_3_v2 |             |
| 2               | 1     | Acople_Extractor      |             |

|              |              |       |        |             |          |              |                   |        |
|--------------|--------------|-------|--------|-------------|----------|--------------|-------------------|--------|
|              |              |       |        | TOLERANCIAS | PESO     | MATERIALES   |                   |        |
|              |              |       |        |             | 0.006 Kg | PLA          |                   |        |
|              |              |       |        |             | FECHA    | NOMBRE       | DENOMINACIÓN      | ESCALA |
|              |              |       |        | DIB.        | 24/01/26 | Adrián Pardo | Efactor Final     | 1:1    |
|              |              |       |        | REV.        |          |              |                   |        |
|              |              |       |        | APROB.      |          |              |                   |        |
|              |              |       |        |             | ESPOL    |              | NÚMERO DEL DIBUJO |        |
|              |              |       |        |             |          |              | 8                 |        |
| EDI-<br>EIGN | MODIFICACIÓN | FECHA | NOMBRE |             |          |              | SUSTITUYE A       |        |

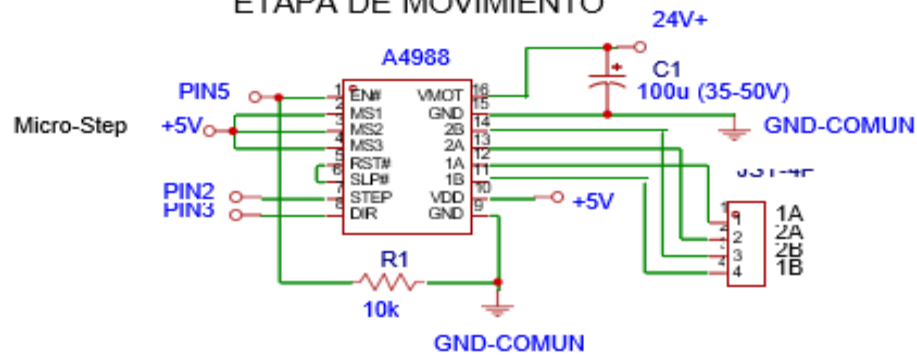


| LISTA DE PIEZAS |       |              |             |
|-----------------|-------|--------------|-------------|
| ELEMENTO        | CTDAD | Nº DE PIEZA  | DESCRIPCIÓN |
| 1               | 1     | Acople_PLA   |             |
| 2               | 1     | Tapa_Carrete |             |

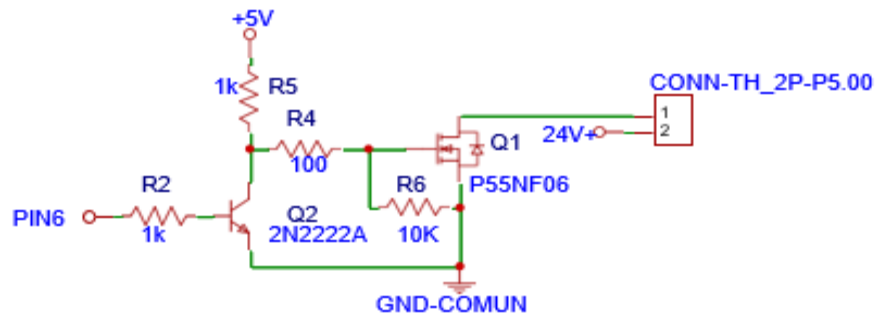
|         |              |       |        |             |          |              |                   |        |
|---------|--------------|-------|--------|-------------|----------|--------------|-------------------|--------|
|         |              |       |        | TOLERANCIAS | PESO     | MATERIALES   |                   |        |
|         |              |       |        |             |          | PLA          |                   |        |
|         |              |       |        |             | FECHA    | NOMBRE       | DENOMINACIÓN      | ESCALA |
|         |              |       |        | DIB.        | 24/01/26 | Adrián Pardo | Acople Carrete    | 1:2    |
|         |              |       |        | REV.        |          |              |                   |        |
|         |              |       |        | APROB.      |          |              |                   |        |
|         |              |       |        |             | ESPOL    |              | NÚMERO DEL DIBUJO | 9      |
| EDICIÓN | MODIFICACIÓN | FECHA | NOMBRE |             |          |              | SUSTITUYE A:      |        |

**Apéndice B**  
Plano Electrónico

### ETAPA DE MOVIMIENTO



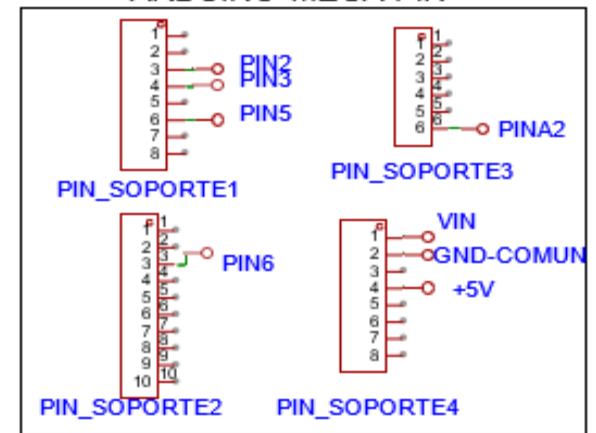
### ETAPA DE POTENCIA



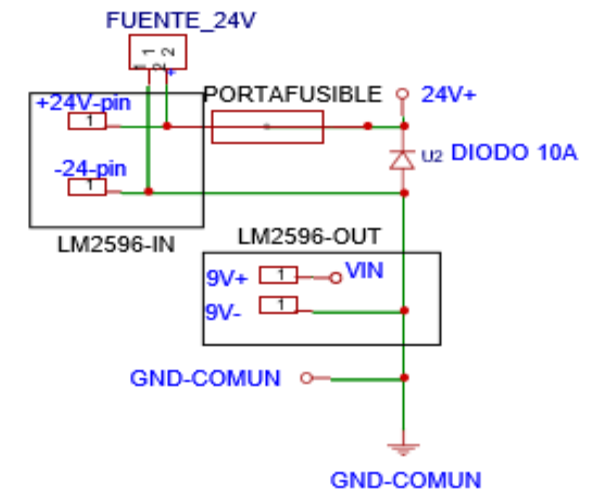
### ETAPA DE TEMPERATURA



### ARDUINO MEGA-PIN



### ETAPA DE ALIMENTACION



|                       |                    |            |
|-----------------------|--------------------|------------|
| TITLE: PCB-Extruder   |                    | REV: 1.0   |
| Company: Your Company |                    | Sheet: 1/1 |
| Date: 2025-11-19      | Drawn By: sehalchi |            |

## **Apéndice C**

### **Programa de Arduino y RAPID**

En el siguiente link de GitHub se encuentra el manual de operación y los códigos de Arduino y RAPID.

Link GitHub: <https://github.com/Aapcmurder/Manual-de-Operaci-n.git>