

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Desarrollo de un Posicionador Robótico de Dos Grados de Libertad para

Manufactura Aditiva

INGE - 3019

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

Pedro Andrés Carpio Rivas

Carlos Eduardo Crespo Constante

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mi amada madre, quien en vida fue mi mayor bendición. Todas sus enseñanzas y sus invaluable sacrificios forjaron el camino para que yo llegue a donde estoy ahora; sin su crianza y su entrega absoluta, jamás habría tenido la fuerza para alcanzar esta meta.

Su mayor anhelo era verme convertido en un profesional, y hoy hago realidad ese sueño. Que este logro sirva como testimonio eterno de que su inmenso esfuerzo no fue en vano, pues aunque su presencia física me falte, su huella y su ejemplo siguen vivos a través del hombre en el que me he convertido.

Pedro Andres Carpio Rivas

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, los pilares de mi vida.

A mi madre, por ser mi inagotable fuente de apoyo y por darme la confianza necesaria para convertirme en la persona que soy.

A mi padre, cuyo respaldo incondicional ha sido el motor fundamental para culminar con éxito mis estudios universitarios.

Gracias a su esfuerzo y sacrificio, he aprendido a superarme y a vencer cada adversidad que se ha cruzado en mi camino.

Esto es por ustedes.

Carlos Eduardo Crespo Constante.

Agradecimientos

Agradezco al Laboratorio CORAL, al Laboratorio de Manufactura y al Club de Mecatrónica por facilitarnos los equipos, herramientas y conocimientos técnicos fundamentales para este prototipo, así como a mis profesores por su guía académica.

Gracias a mis amigos por sus valiosos aportes al proyecto. Finalmente, mi gratitud total a mi familia: a mi padre, por su inmensa generosidad y por brindarme todas las oportunidades para alcanzar esta meta; a mi hermana, por ser mi consejera y soporte constante; y a mi esposa, por ser mi apoyo incondicional y quien me animó en cada paso de mi formación profesional.

Pedro Andres Carpio Rivas

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mis padres y hermanos, por su amor y sacrificio. A mis amigos, por estar siempre presentes.

Extiendo un agradecimiento especial al Laboratorio CORAL, al Laboratorio de Manufactura y Control Industrial, al Club de Mecatrónica. Su apoyo fue fundamental al facilitarnos el acceso a equipos, herramientas y conocimientos técnicos claves para la materialización de este prototipo. De igual manera, agradezco a todos los profesores de la carrera por su orientación durante todo el proceso académico.

Carlos Eduardo Crespo Constante

Declaración Expresa

Nosotros, Pedro Andrés Carpio Rivas y Carlos Eduardo Crespo Constante, 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 a 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, 13 de octubre del 2025.



Pedro Andrés Carpio

Rivas



Carlos Eduardo Crespo

Constante

Evaluadores

Jorge Luis Hurel Ezeta. PhD.

Profesor de Materia

Marcelo Rodolfo Fajardo Pruna. PhD.

Tutor de proyecto

Resumen

La manufactura aditiva enfrenta limitaciones geométricas que obligan el uso de soportes, reduciendo la eficiencia del proceso. El presente proyecto desarrolla un posicionador robótico de dos grados de libertad para optimizar la impresión FDM mediante la reorientación dinámica de la pieza. El objetivo central es integrar una arquitectura de hardware abierto con un controlador industrial ABB, justificando la necesidad de soluciones accesibles frente a equipos comerciales costosos y cerrados. Para el desarrollo se utilizó una metodología de diseño mecatrónico iterativa; se modelaron los componentes en software CAD y se validaron estructuralmente mediante análisis de elementos finitos. La construcción física empleó manufactura aditiva en PLA/PETG, motores paso a paso y correas síncronas, gestionados por un microcontrolador Arduino con comunicación TCP/IP hacia el entorno RobotStudio. Los resultados evidenciaron una sincronización efectiva entre la controladora y el prototipo físico, logrando una precisión de posicionamiento inferior a 0.1° en basculación y una estabilidad térmica de $\pm 2^\circ\text{C}$. Se concluye que la integración de protocolos estándar con controladores industriales es técnica y económicamente viable, validando un sistema funcional que democratiza el acceso a tecnologías de manufactura multi axial en entornos académicos.

Palabras Clave: Manufactura aditiva, TCP/IP, Diseño mecatrónico, Arduino, RobotStudio.

Abstract

Additive manufacturing faces geometric limitations that force the use of support, reducing process efficiency. This project develops a two-degree-of-freedom robotic positioner to optimize FDM printing through dynamic part reorientation. The central objective is to integrate open hardware architecture with an ABB industrial controller, justifying the need for accessible solutions versus expensive and closed commercial equipment. An iterative mechatronic design methodology was used for development; components were modeled in CAD software and structurally validated through Finite Element Analysis. The physical construction employed additive manufacturing in PLA/PETG, stepper motors, and timing belts, managed by an Arduino microcontroller with TCP/IP communication towards the RobotStudio environment. The results evidenced effective synchronization between the controller and the physical prototype, achieving a positioning precision lower than 0.1° in tilting and a thermal stability of $\pm 2^\circ\text{C}$. It is concluded that integrating standard protocols with industrial controllers is technically and economically viable, validating a functional system that democratizes access to multi-axis manufacturing technologies in academic environments.

Keywords: Additive manufacturing, TCP/IP, Mechatronic design, RobotStudio, Arduino.

Índice general

| | |
|---|------|
| Evaluadores | 7 |
| Resumen | I |
| <i>Abstract</i> | II |
| Índice general | III |
| Abreviaturas | VI |
| Simbología | VII |
| Índice de figuras | VIII |
| Índice de tablas..... | X |
| Índice de planos..... | XI |
| Capítulo 1 | 1 |
| 1. Introducción | 2 |
| 1.1 Descripción del Problema | 3 |
| 1.2 Justificación del Problema | 5 |
| 1.3 Objetivos | 7 |
| 1.3.1 Objetivo general | 7 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 7 |
| 1.4 Marco teórico | 7 |
| 1.4.1 Cinemática y Destreza Robótica para Manufactura Aditiva | 8 |
| 1.4.2 Modelado por Deposición Fundida (FDM) y Variables Críticas | 9 |
| 1.4.3 Requerimientos Mecatrónicos..... | 14 |
| 1.4.4 Estado del Arte en Impresión Multi-Eje | 17 |
| Capítulo 2 | 20 |
| 2. Metodología. | 21 |
| 2.1 Requerimientos y restricciones del sistema | 21 |
| 2.1.1 Requerimientos funcionales y técnicos | 21 |

| | | |
|------------|--|----|
| 2.1.2 | Otros requerimientos | 22 |
| 2.2 | Alternativas de solución | 23 |
| 2.2.1 | Alternativas consideradas..... | 23 |
| 2.2.2 | Selección de solución adecuada | 23 |
| 2.3 | Diseño conceptual del posicionador roto-basculante | 24 |
| 2.3.1 | Diseño mecánico | 25 |
| 2.3.2 | Diseño electrónico..... | 29 |
| 2.3.3 | Diseño de control | 32 |
| 2.3.4 | Estrategia de control de movimiento..... | 33 |
| 2.3.5 | Diseño de programación y simulación..... | 33 |
| 2.3.6 | Integración y validación del sistema | 36 |
| Capítulo 3 | | 39 |
| 3. | Resultados y análisis | 40 |
| 3.1 | Resultados del diseño mecánico..... | 40 |
| 3.1.1 | Modelamiento de piezas en software CAD..... | 40 |
| 3.1.2 | Análisis estructural y simulación dinámica..... | 42 |
| 3.1.3 | Integración de actuadores y sistema de transmisión de potencia | 46 |
| 3.1.4 | Tabla de componentes mecánicos | 49 |
| 3.1.5 | Impresión 3D de piezas estructurales..... | 50 |
| 3.1.6 | Ensamble e Integración de componentes mecánicos | 52 |
| 3.2 | Resultados de RobotStudio | 53 |
| 3.2.1 | Creación del eje externo en RobotStudio..... | 54 |
| 3.2.2 | Creación de la interfaz de usuario dentro de RobotStudio..... | 55 |
| 3.3 | Resultados del diseño electrónico | 58 |
| 3.3.1 | Esquemático de conexiones | 59 |
| 3.3.2 | Montaje de conexiones físico..... | 63 |

| | | |
|------------|--|----|
| 3.4 | Resultados del diseño de control..... | 64 |
| 3.4.1 | Respuestas del control PID de temperatura..... | 64 |
| 3.5 | Resultados de pruebas finales | 65 |
| 3.6 | Análisis de costos | 66 |
| 3.7 | Resultados de precisión del prototipo. | 69 |
| 3.8 | Limitaciones del prototipo | 71 |
| Capítulo 4 | | 73 |
| 4. | Conclusiones y Recomendaciones | 74 |
| 4.1 | Conclusiones | 74 |
| 4.2 | Recomendaciones..... | 75 |

Abreviaturas

ABB — Asea Brown Boveri

ADC — Analog-to-Digital Converter

CAD — Computer-Aided Design

FDM — Fused Deposition Modeling

FEA — Finite Element Analysis

GDL — Grados de Libertad

HMI — Human-Machine Interface

I/O — Input/Output (Entrada/Salida)

IPOS — Input, Processing, Output, Storage

IRC5 — Industrial Robot Controller 5

ISO — International Organization for Standardization

NEMA — National Electrical Manufacturers Association

PETG — Polyethylene Terephthalate Glycol

PID — Proportional-Integral-Derivative

PLA — Polylactic Acid

PWM — Pulse Width Modulation

SPI — Serial Peripheral Interface

TCP/IP — Transmission Control Protocol/Internet Protocol

TPU — Thermoplastic Polyurethane

Simbología

| | |
|----------|---------------------------------|
| α | Aceleración angular |
| β | Coefficiente Beta del termistor |
| d | Distancia o brazo de palanca |
| $e(t)$ | Error de control |
| F | Fuerza |
| FS | Factor de Seguridad |
| g | Aceleración de la gravedad |
| J | Momento de inercia |
| K_d | Ganancia derivativa |
| K_i | Ganancia integral |
| K_p | Ganancia proporcional |
| m | Masa |
| r | Radio |
| R | Resistencia eléctrica |
| T | Temperatura |
| $u(t)$ | Acción de control |
| τ | Torque o Par motor |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 <i>Ilustración de las Áreas que Requieren Soporte y las Estructuras Generadas</i> | 4 |
| Figura 1.2 <i>Efecto del Ángulo de Voladizo en la Calidad de la Impresión Aditiva</i> | 4 |
| Figura 1.3 <i>Diagrama del proceso de Modelado por Deposición Fundida (FDM)</i> | 10 |
| Figura 1.4 <i>Voladizos y efecto de la gravedad en diferentes grados</i> | 12 |
| Figura 1.5 <i>Comparación de capacidades de impresión 3D de 3, 4 y 5 ejes</i> | 13 |
| Figura 1.6 <i>Esquema y Componentes Principales de un Reductor Cicloidal</i> | 15 |
| Figura 1.7 <i>Esquema y Componentes Principales de un Reductor Cicloidal</i> | 18 |
| Figura 1.8 <i>Esquema de la Plataforma Stewart-Gough</i> | 18 |
| Figura 2.1 <i>Diagrama de flujo de la metodología usada</i> | 21 |
| Figura 2.2 <i>Diagrama de flujo de la programación Rapid</i> | 34 |
| Figura 2.3 <i>Diagrama de flujo de la programación Arduino</i> | 36 |
| Figura 3.1 <i>Ensamble del prototipo en Autodesk Inventor</i> | 40 |
| Figura 3.2 <i>Análisis de esfuerzo de Von Mises para la pieza: Soporte Lateral</i> | 42 |
| Figura 3.3 <i>Análisis del factor de seguridad para la pieza: Soporte Lateral</i> | 43 |
| Figura 3.4 <i>Análisis de estrés de Von Mises para la pieza: Hamaca</i> | 43 |
| Figura 3.5 <i>Análisis del factor de seguridad para la pieza: Hamaca</i> | 44 |
| Figura 3.6 <i>Análisis del factor de seguridad para la pieza: Conector de transición</i> | 44 |
| Figura 3.7 <i>Análisis dinámico del movimiento de basculación, variable graficada: Torque aplicado por el motor Eje A</i> | 45 |
| Figura 3.8 <i>Análisis dinámico del movimiento de basculación, variable graficada: Torque aplicado por el motor Eje B</i> | 45 |
| Figura 3.9 <i>Imagen del motor NEMA 23</i> | 47 |
| Figura 3.10 <i>Imagen del motor NEMA 17</i> | 47 |
| Figura 3.11 <i>Imagen del motor NEMA 23 acoplado a su sistema de transmisión de potencia</i> | 48 |
| Figura 3.12 <i>Imagen del motor NEMA 17 acoplado a su sistema de transmisión de potencia</i> | 49 |
| Figura 3.13 <i>Proceso de impresión 3D de la hamaca</i> | 51 |
| Figura 3.14 <i>Impresión 3D del acople central</i> | 51 |
| Figura 3.15 <i>Impresión 3D de los soportes laterales</i> | 52 |
| Figura 3.16 <i>Ensamble mecánico final</i> | 53 |
| Figura 3.17 <i>Subensamble rotacional</i> | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.18 <i>Subensamble base fija.</i> | 54 |
| Figura 3.19 <i>Subensamble bascular.</i> | 55 |
| Figura 3.20 <i>Ensamble final en Robot Studio como eje externo.</i> | 55 |
| Figura 3.21 <i>Figura de la pantalla principal del Flexpendant.</i> | 56 |
| Figura 3.22 <i>Figura de la pantalla “movimiento” del Flexpendant.</i> | 56 |
| Figura 3.23 <i>Figura de la pantalla “Temperatura” del Flexpendant.</i> | 57 |
| Figura 3.24 <i>Figura de la pantalla “Diagnostico” del Flexpendant.</i> | 57 |
| Figura 3.25 <i>Figura de la pantalla “Retorno a Origen” del Flexpendant.</i> | 58 |
| Figura 3.26 <i>Figura de la pantalla “Rutina de Calibración” del Flexpendant.</i> | 58 |
| Figura 3.27 <i>Conexiones entre Arduino y pines de señales.</i> | 60 |
| Figura 3.28 <i>Conexiones de potencia 24V.</i> | 60 |
| Figura 3.29 <i>Esquema de conexiones de los controladores TB6600.</i> | 61 |
| Figura 3.30 <i>Conexiones de señales 5V</i> | 61 |
| Figura 3.31 <i>Esquemático final</i> | 63 |
| Figura 3.32 <i>Apilamiento de la Shield Ethernet</i> | 63 |
| Figura 3.33 <i>Cableado final del prototipo</i> | 64 |
| Figura 3.34 <i>Gráfica de temperatura vs setpoint.</i> | 65 |
| Figura 3.35 <i>Figura que muestra el envío del comando desde el Flexpendant.</i> | 66 |
| Figura 3.36 <i>Figura que donde se visualiza el movimiento de la mesa.</i> | 66 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1 <i>Propiedades relevantes de materiales termoplásticos para FDM</i> | 11 |
| Tabla 2.1 <i>Requerimientos funcionales y técnicos del posicionador roto-basculante</i> | 22 |
| Tabla 2.2 <i>Requerimientos no técnicos del posicionador roto-basculante</i> | 22 |
| Tabla 2.3 <i>Matriz IPOS para la selección de la configuración del posicionador</i> | 24 |
| Tabla 3.1 <i>Tabla de elementos del ensamble</i> | 41 |
| Tabla 3.2 <i>Tabla de resultados del Torque requerido</i> | 46 |
| Tabla 3.3 <i>Tabla descriptiva de los parámetros de transmisión de potencia</i> | 48 |
| Tabla 3.4 <i>Tabla de los componentes mecánicos</i> | 49 |
| Tabla 3.5 <i>Tabla de elementos impresos en 3D</i> | 50 |
| Tabla 3.6 <i>Tabla de pines digitales y analógicos usados en el Arduino Mega</i> | 59 |

Índice de planos

- PLANO 1 Implementación general del muelle
- PLANO 2 Ubicación de ánodos en tablestacado frontal
- PLANO 3 Ubicación de ánodos en tablestacado lateral norte y sur

Capítulo 1

1. Introducción

La manufactura aditiva se consolida como un conjunto de tecnologías que construyen objetos tridimensionales mediante la adición controlada de material capa por capa a partir de modelos CAD, habilitando prototipado ágil, personalización y geometrías complejas [1], [2], [3]. En procesos FDM, la necesidad de estructuras de soporte ante voladizos y superficies críticas encarece las piezas, incrementa tiempos de posprocesamiento y afecta la calidad superficial [1], [4]. Además, el límite geométrico asociado a la gravedad (p. ej., cercanos a 45°) condiciona la orientación local de deposición y restringe la eficiencia del proceso [4], [5]. Frente a ello, las estrategias de impresión multi-eje permiten orientar la boquilla o la pieza para mantener condiciones de deposición favorables y disminuir la dependencia de soportes [2], [3].

La problemática que se aborda consiste en el uso de soportes en el proceso de impresión FDM debido a la gravedad y al enfriamiento del filamento, llevando a la reducción de eficiencia del proceso. Estudios recientes muestran que la reorientación dinámica mediante ejes adicionales en la pieza puede ampliar el rango de ángulos imprimibles y minimizar soportes [3], [2].

Para la solución de la problemática se realiza el involucramiento del diseño mecatrónico, selección e integración de actuadores y transmisiones, cinemática y control de manipuladores, además de comunicación industrial basada en estándares (TCP/IP) [6], [7]. Dado su carácter multidisciplinario, el trabajo integra criterios mecánicos, electrónicos y de software en un único sistema funcional.

En cuanto a su vinculación con el sector productivo y la sociedad, el desarrollo de un posicionador orientado a FDM contribuye a reducir desperdicio de material, tiempos de fabricación y costos de posprocesamiento, al tiempo que mejora la calidad y la repetibilidad de piezas prototipo. Asimismo, el uso de arquitecturas abiertas e interfaces estándar favorece la

interoperabilidad y limita la dependencia de soluciones propietarias, aspecto relevante para laboratorios, pymes y entornos educativos [8].

El alcance general del trabajo se orienta al desarrollo e integración de un posicionador robótico de dos grados de libertad (rotación y volteo) para impresión FDM asistida por robot, procurando orientaciones óptimas de deposición que disminuyan el uso de soportes, con integración de comunicación TCP/IP hacia el controlador del robot y validación funcional en un entorno de laboratorio [2], [7].

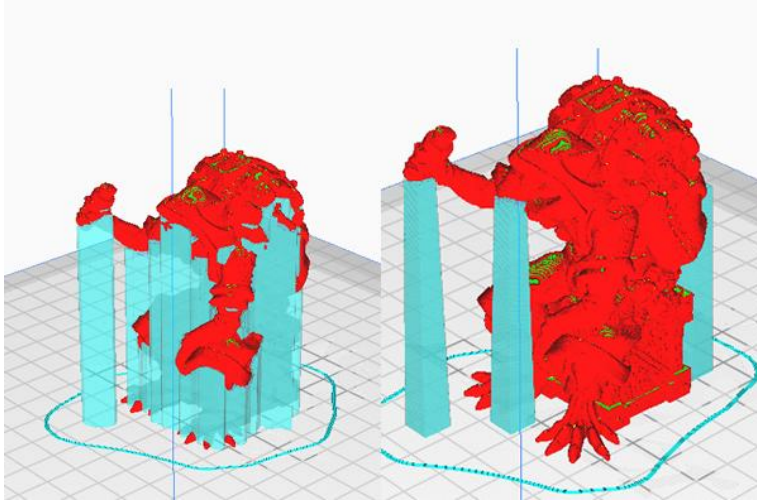
1.1 Descripción del Problema

La manufactura aditiva mediante impresión 3D con brazos robóticos desperdicia su potencial de destreza, debido a la gravedad y el lento enfriamiento del filamento. Estas limitaciones obligan a depender de estructuras de soporte, lo que impacta a la industria manufacturera al generar desperdicio de material, mayores tiempos y costos de posprocesamiento y una menor calidad superficial que compromete la integridad de las piezas [9].

El proceso de extrusión de polímeros (como PLA o TPU) presenta una limitación fundamental que impide usar la destreza completa de un brazo robótico durante el proceso. Al crear estructuras complejas o voladizos, se requiere la implementación de soportes que se imprimen en conjunto con la pieza (Ver Figura 1.1).

Figura 1.1

Ilustración de las Áreas que Requieren Soporte y las Estructuras Generadas

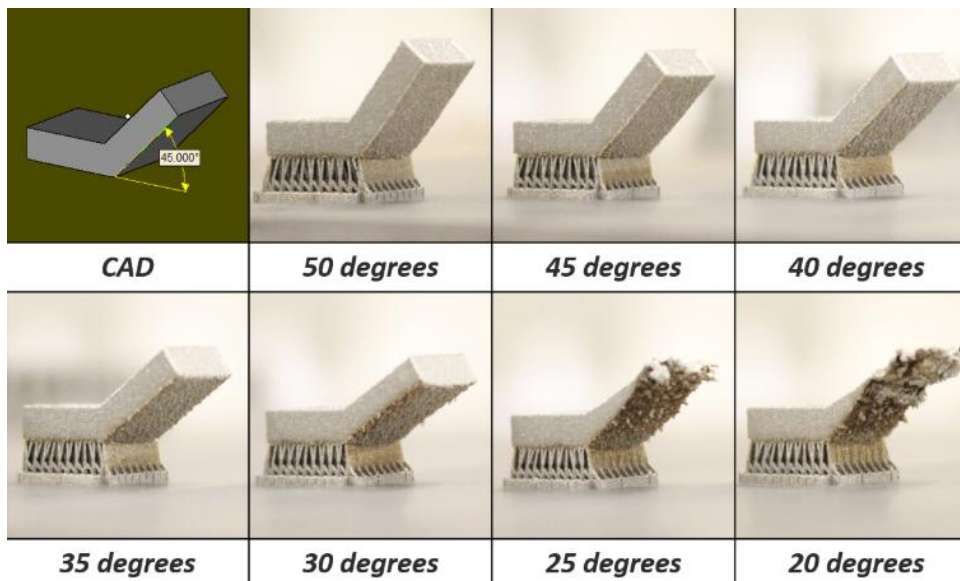


Nota. El área resaltada en rojo indica las zonas de la pieza. La imagen ilustra la necesidad de soportes para voladizos complejos. Adaptado de [10].

Esto se debe a que, cuando el efector final deposita material en orientaciones mayores a 45° , y no se han creado los soportes, el material por efecto de la gravedad se deforma y colapsa, dañando la pieza generada [9] (Ver Figura 1.2).

Figura 1.2

Efecto del Ángulo de Voladizo en la Calidad de la Impresión Aditiva



Nota. Adaptado de Análisis de las direcciones de construcción en la fabricación aditiva de estructuras voladizas. Reproducido de [11].

Esto provoca que aun teniendo un robot que puede extruir el material en diferentes orientaciones, el proceso de deposición de material no permite que este brazo pueda tomar estas orientaciones, lo que impide la creación de piezas complejas debido a que no hay soportes a los que se adhiere el material.

Por lo tanto, al hacer uso de ángulos superiores a los 45 grados, inclusive si se tiene mayor destreza con respecto a la orientación, es necesaria la inclusión de estructuras de soporte para aumentar el potencial de la manufactura aditiva [5].

1.2 Justificación del Problema

La dependencia de estructuras de soporte, como se describió en la sección anterior, genera un problema económico directo por el desperdicio de material y un problema operativo crítico debido a los costos y tiempos de posprocesamiento. Esta ineficiencia justifica la necesidad de una solución tecnológica que, al dotar al sistema de dos grados de libertad, minimice el uso de soportes, amplificando las capacidades de manufactura aditiva de un brazo robótico [2], [12].

El Laboratorio de Manufactura y Robótica Industrial de ESPOL dispone de un brazo robótico industrial ABB, capaz de realizar manufactura aditiva. Sin embargo, su uso se enfrenta al problema de deposición de material. Por lo que, se requiere la implementación de un dispositivo que permita la impresión en orientaciones óptimas. Al diseñar un posicionador que provea los dos grados de libertad adicionales (rotación y volteo), se puede minimizar la necesidad de soportes. Investigaciones en impresión multi-eje han demostrado que se puede minimizar la necesidad de soportes, permitiendo incluso imprimir en ángulos de hasta 100° en lugar del límite tradicional de 45° [5].

Al trabajar con las tecnologías disponibles en el laboratorio, se maximiza la utilidad del brazo robótico existente sin la adquisición de nueva maquinaria que implica una inversión costosa. Además, un posicionador de diseño propio se adecúa a los requerimientos específicos del laboratorio, algo que los posicionadores industriales disponibles en el mercado no cumplen. Dichas soluciones comerciales están sobredimensionadas para el prototipado ligero con impresión 3D, ya que su propósito se enfoca en aspectos industriales como capacidades de carga y soldadura automotriz, volviéndolos inadecuados tanto en costo como en utilidad para esta aplicación [3].

Finalmente, una barrera adicional para la adopción de los posicionadores del mercado es su integración cerrada. Estos sistemas utilizan protocolos de comunicación propietarios, lo que crea una dependencia de las tecnologías del fabricante, dificultando el uso de los equipos con diferentes marcas. El posicionador de diseño propio se integra mediante protocolos de comunicación TCP/IP, un estándar industrial. Este sistema de comunicación permite compatibilidad con el controlador del robot, asegurando la estabilidad en la comunicación de los sistemas y permitiendo que el laboratorio tenga una opción de solución flexible [6] [13].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo funcional de un posicionador robótico de 2 grados de libertad, mediante diseño mecatrónico, garantizando la integración con un controlador IRC5 ABB.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar el modelo mecánico del posicionador robótico en software CAD, para el dimensionamiento estructural y la selección de los motores a paso con sus sistemas de transmisión de potencia que soporten las condiciones de trabajo.
2. Integrar el modelo CAD del posicionador en el entorno RobotStudio, configurándolo como un mecanismo funcional, para la verificación de su correcto accionamiento y control de movimiento dentro de la simulación.
3. Implementar un sistema embebido que permita el control de los motores a paso y, a su vez, establezca la comunicación con el controlador IRC5 mediante el protocolo TCP/IP.
4. Construir el prototipo físico del posicionador, integrando sus componentes mecánicos y sistema de control, validando su funcionamiento mediante una prueba de uso real.

1.4 Marco teórico

A continuación, se presentan los principios y consideraciones técnicas que sustentan el desarrollo de un posicionador robótico de dos grados de libertad para manufactura aditiva por deposición fundida (FDM). Se abordan la cinemática y el control de manipuladores, las limitaciones físicas del proceso FDM (enfriamiento, gravedad, ángulos críticos de voladizo) y las propiedades relevantes de materiales termoplásticos. Cada apartado concluye señalando su impacto directo en el problema particular del proyecto: minimizar el uso de soportes y asegurar deposición continua y estable a través de reorientación dinámica de la pieza.

1.4.1 Cinemática y Destreza Robótica para Manufactura Aditiva

La robótica industrial es el componente central en la automatización de manufactura aditiva flexible. Un brazo robótico es un manipulador diseñado para mover herramientas, piezas o materiales mediante una serie de movimientos programados. Su alta aptitud para realizar tareas emulando la cinemática del brazo humano los convierte en un elemento fundamental de la manufactura avanzada [14]

Grados de Libertad (DOF) y Requerimientos de Impresión.

La destreza de un robot está determinada por sus grados de libertad. Un grado de libertad representa un eje de movimiento independiente, ya sea lineal (traslación) o rotativo (articulación) [15]. Los manipuladores industriales de seis grados de libertad (6-DOF) representan el estándar, pues permiten que el efector final alcance cualquier posición y orientación dentro de su espacio de trabajo tridimensional [14].

Se distinguen dos tipos de movimientos:

Posicionamiento (3-DOF): desplazamientos en los ejes cartesianos X, Y y Z.

Orientación (3-DOF): rotaciones en torno a los ejes de Euler: giro (roll), cabeceo (pitch) y guiñada (yaw).

El análisis cinemático, comúnmente modelado mediante los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H), es esencial para calcular trayectorias y controlar el efector final con precisión [14] – [16]. En el contexto de la manufactura aditiva, este análisis permite determinar las orientaciones válidas de impresión y definir los límites de movimiento del posicionador que complementará al robot principal [2], [12].

Espacio de Trabajo y Singularidades.

El espacio de trabajo de un robot corresponde al volumen que el efector final puede alcanzar, determinado por la geometría de sus eslabones y los límites articulares [15].

Sin embargo, dentro de este espacio existen configuraciones específicas que deben ser evitadas: las singularidades. Una singularidad es una configuración en la que el robot pierde, instantáneamente, uno o más grados de libertad [17], [18]. En un punto singular, el efector final "no puede ser controlado para moverse en ciertas direcciones" [18].

Al aproximarse a un punto singular, el controlador requeriría velocidades de articulación "peligrosas" o "infinitas" para mantener una velocidad constante en la boquilla. Esto resulta en una pérdida de controlabilidad e "inestabilidad, pobre rendimiento", lo cual es crítico para la calidad del proceso de deposición continua [17], [18].

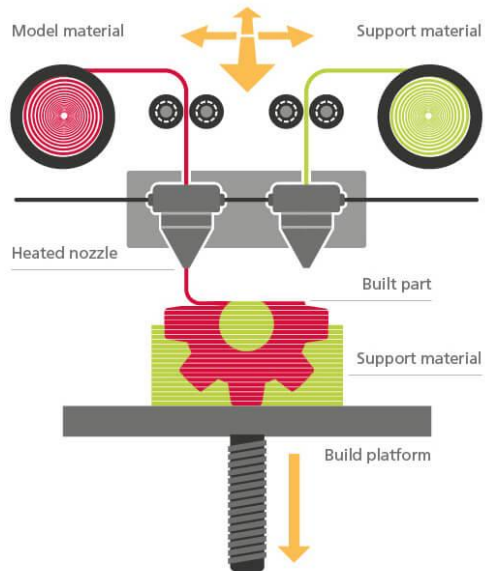
1.4.2 Modelado por Deposición Fundida (FDM) y Variables Críticas

La manufactura aditiva (MA) es un conjunto de tecnologías que construyen objetos tridimensionales mediante la adición controlada de material capa por capa, a partir de un modelo digital de diseño asistido por computador (CAD) [1]. Entre sus técnicas, el modelado por deposición fundida (FDM) es la más difundida por su bajo costo, sencillez de operación y compatibilidad con múltiples termoplásticos [1].

Este filamento se alimenta a un cabezal calentado, donde se funde y es depositado en una trayectoria planificada sobre una plataforma, formando sucesivas capas hasta completar la pieza [19], [20]. La boquilla calentada deposita este material fundido "siguiendo una trayectoria predeterminada" en una plataforma de construcción, creando una capa 2D (Ver Figura 1.3).

Figura 1.3

Diagrama del proceso de Modelado por Deposición Fundida (FDM)



Nota. Ilustra los componentes principales (extrusor, boquilla, plataforma) y el flujo de filamento en la tecnología FDM. Tomado de Ricoh 3D [19].

Variables críticas del proceso FDM.

La calidad de las piezas FDM depende de un conjunto de parámetros interrelacionados:

Temperatura de extrusión: controla la viscosidad del polímero. En materiales como PLA, el rango típico es 190–220 °C; temperaturas inferiores reducen la adhesión entre capas, mientras que valores excesivos degradan el material [20], [21].

Velocidad de impresión: define el tiempo disponible para la fusión entre capas. Velocidades entre 40 y 80 mm/s son comunes; mayores valores reducen la calidad dimensional [20], [21].

Altura de capa: influye en la resolución y el tiempo total de impresión. Capas de 0,1 mm ofrecen mayor detalle, pero prolongan el proceso, mientras que capas de 0,3 mm lo aceleran a costa del acabado superficial [20], [21].

Propiedades de Polímeros para FDM (PLA, TPU).

Las propiedades termo-físicas de los polímeros determinan su comportamiento durante la deposición y su estabilidad frente a la gravedad. En la Tabla 1.1 se resumen las principales características de los materiales utilizados en el laboratorio: PLA y TPU, según [20], [21].

Tabla 1.1

Propiedades relevantes de materiales termoplásticos para FDM

| Propiedad | PLA | TPU |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------|
| Densidad (g/cm ³) | 1.24 – 1.27 | 1.10 – 1.21 |
| Temperatura de extrusión (°C) | 190 – 220 | 210 – 250 |
| Temperatura de transición vítrea (°C) | 55 – 65 | -30 – -10 |
| Módulo elástico (MPa) | 3500 – 4000 | 25 – 50 |
| Comportamiento mecánico | Rígido y frágil | Flexible y elástico |

Nota. Datos tomados de [20], [21].

El PLA ofrece buena estabilidad dimensional y facilidad de impresión, mientras que el TPU presenta alta flexibilidad y absorción de energía. Sin embargo, su baja rigidez en estado

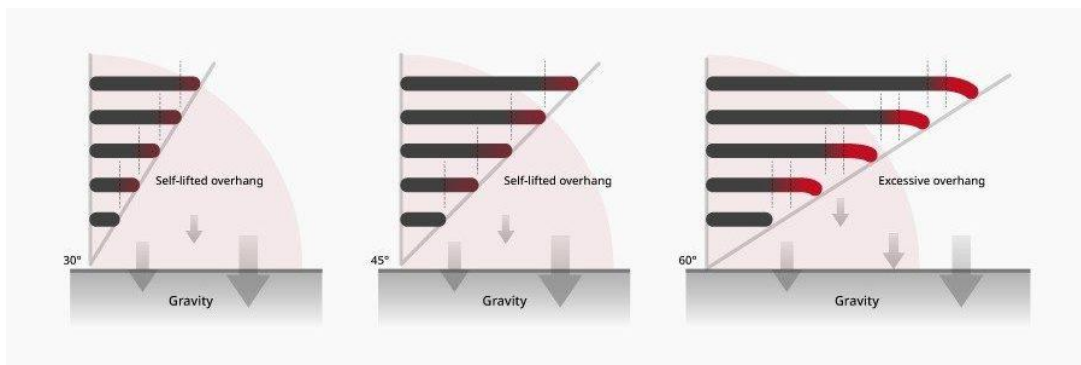
fundido incrementa la deformación por gravedad, lo que limita los ángulos imprimibles sin soporte [20], [21].

Limitaciones del FDM: El Problema de los Voladizos.

El carácter capa por capa del FDM impone una restricción geométrica debido a la gravedad: cada nueva capa requiere una base sólida. Cuando el ángulo de voladizo supera aproximadamente 45° , el material se deposita parcialmente en el aire, generando deformaciones o colapsos, como se ilustra en la Figura 1.4 [1], [19]. (Ver Figura 1.4).

Figura 1.4

Voladizos y efecto de la gravedad en diferentes grados.



Nota: Ilustra cómo la gravedad afecta a los voladizos según el ángulo de inclinación (30° , 45° , 60°). Tomado de Raise3D [22].

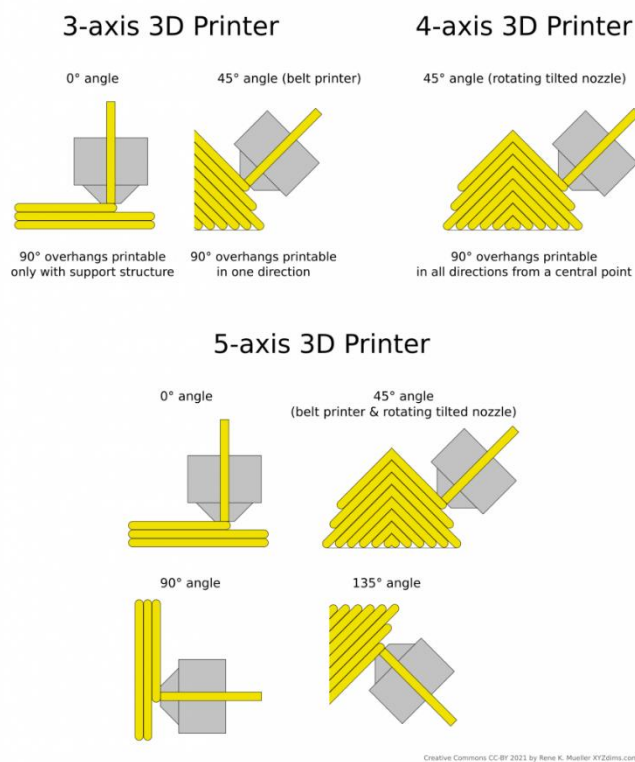
Para compensar esta limitación, se emplean estructuras de soporte, las cuales aumentan el tiempo de fabricación, el consumo de material y reducen la calidad superficial [4]. En el caso de la impresión robótica, esta restricción limita el aprovechamiento de los grados de libertad del brazo, ya que la orientación del efector debe mantenerse a menos de 45° para evitar el colapso del filamento [5].

Impresión 3D Multi-Eje y Orientación Óptima.

La manufactura aditiva multi-eje, también denominada impresión no planar, busca superar las limitaciones geométricas del FDM tradicional mediante la deposición controlada en trayectorias curvas, cómo se ilustra en la Figura 1.5. Al permitir la reorientación de la pieza durante la impresión, el sistema puede mantener el eje de extrusión perpendicular a la superficie local de la pieza, reduciendo o eliminando la necesidad de soportes [3].

Figura 1.5

Comparación de capacidades de impresión 3D de 3, 4 y 5 ejes



Nota: Muestra cómo los ejes adicionales permiten imprimir voladizos de 90° sin soportes. Tomado de Mueller [23].

1.4.3 *Requerimientos Mecatrónicos*

La función del posicionador en celdas de manufactura aditiva es ubicar y sostener la pieza de trabajo en orientaciones definidas durante la deposición, lo cual exige la integración de subsistemas mecánicos, de actuación y control que aseguren estabilidad posicional, repetibilidad y continuidad del movimiento [6].

Sistemas de Transmisión de Potencia.

El movimiento del actuador (habitualmente de alta velocidad y bajo par) debe transformarse mediante una transmisión mecánica en un movimiento de posicionamiento de baja velocidad y alto par, garantizando la resolución, la rigidez y el control de holgura requeridos por el sistema [6], [24]. En posicionadores de dos grados de libertad (rotación y volteo) se emplean, entre otros, conjuntos de tornillo sin fin, trenes cicloidales y apoyos con rodamientos de contacto angular precargados para soportar cargas combinadas y asegurar la estabilidad posicional durante la deposición [24], [25].

Reductor de tornillo sin fin: ofrece relaciones de reducción elevadas en volumen compacto y, en muchas configuraciones, carácter auto bloqueante, lo que impide el retroceso de la carga y facilita el mantenimiento de la posición sin freno adicional [25]. Presenta menores eficiencias que otros trenes y puede requerir control de holgura mediante ajuste y lubricación adecuados [25].

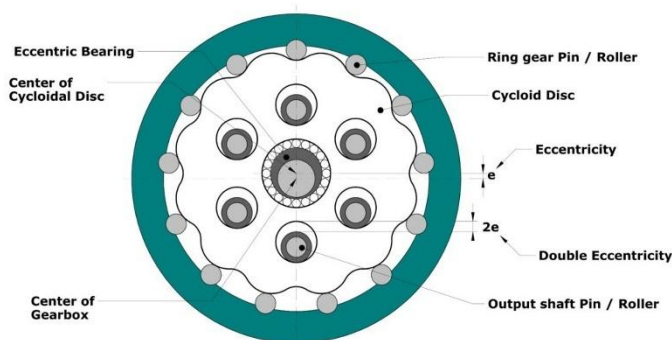
Reductor cicloidal: combina alta relación de reducción con compacidad, baja holgura y elevada rigidez torsional, propiedades utilizadas en posicionamiento de precisión; no es auto bloqueante y puede requerir freno si se demanda retención pasiva (Ver Figura 1.6) [26].

Reducción mediante el uso de poleas y bandas síncronas: De acuerdo con Bhandari, la transmisión por correas síncronas en una configuración de reducción disminuye la velocidad angular para multiplicar proporcionalmente el par disponible para la carga. Específicamente, el

perfil de diente GT2 emplea una geometría diseñada para minimizar el juego mecánico y distribuir uniformemente los esfuerzos. [24]

Figura 1.6

Esquema y Componentes Principales de un Reductor Cicloidal



Nota: El diagrama ilustra el mecanismo de reducción de velocidad mediante un disco cicloide y rodillos, destacando la excentricidad y la doble excentricidad en la transmisión. Adaptado de [27].

Rodamientos y ejes: para cargas combinadas (axiales por peso y radiales por inercia) se emplean rodamientos de contacto angular y arreglos precargados, con el fin de incrementar la rigidez del apoyo y minimizar la holgura del conjunto de transmisión [24].

Actuadores.

Motores a paso: convierten pulsos eléctricos en incrementos angulares definidos y pueden operar en lazo abierto en aplicaciones con cargas predecibles; aportan par de retención y una

implementación de control sencilla. Con micro paso y reducción mecánica es posible alcanzar resoluciones finas; pueden incorporar decodificadores para retroalimentación si se requiere [25]. Servomotores: integran realimentación y control en lazo cerrado para desempeño dinámico y precisión superiores, con mayor complejidad y costo relativos frente a soluciones en lazo abierto [25].

Protocolos de Comunicación Industrial: TCP/IP.

Para el intercambio de comandos y estados entre el controlador del robot y el sistema embebido del posicionador se emplea TCP/IP sobre red local (Ethernet). IP proporciona direccionamiento y encaminamiento de paquetes, mientras que TCP establece una conexión fiable y ordenada, con control de errores y de flujo, de modo que los mensajes de control lleguen íntegros y en secuencia [7]. La comunicación se implementa normalmente mediante sockets bajo un modelo cliente–servidor, lo que permite estructurar tramas de “comando y respuesta” y mantener sesiones persistentes durante el ciclo de impresión [7].

Comparativa: Sistemas Proprietarios vs. Control Abierto

Sistemas propietarios. En robótica industrial, las arquitecturas propietarias integran hardware, firmware, bus de campo y herramientas de programación dentro del ecosistema de los fabricantes. Este enfoque ofrece integración inmediata, soporte unificado y componentes certificados para seguridad funcional; sin embargo, conlleva dependencia del proveedor, limitaciones de acceso a interfaces de bajo nivel y restricciones de interoperabilidad con equipos de terceros, lo que eleva el costo de actualización y dificulta la reconfiguración de la celda construida con este sistema [8].

Sistemas abiertos. Las arquitecturas abiertas se basan en interfaces, protocolos estándar y modularidad hardware–software que permite interoperabilidad, extensibilidad y configurabilidad

del sistema de producción. De acuerdo con la literatura de productos de arquitectura abierta, este enfoque reduce costos de ciclo de vida y facilita la integración y el mantenimiento al desacoplar control, comunicación y dispositivos, posibilitando reemplazos y ampliaciones sin alterar el resto del sistema [8].

En el contexto del posicionador, una arquitectura abierta permite al módulo embebido exponer servicios de comunicación estándar hacia el controlador del robot, manteniendo independencia del fabricante [8].

1.4.4 Estado del Arte en Impresión Multi-Eje

La manufactura aditiva más allá de capas planas se ha orientado a planificación de orientación y trayectorias no planares para reducir o eliminar soportes, aprovechando movimientos multi-eje y restricciones cinemáticas del sistema robot–pieza [2].

Soluciones robóticas.

Los primeros enfoques con brazos 6-DOF mantuvieron la pieza estática y exploraron deposición sobre superficies y capas curvas; si bien mejoran propiedades mecánicas, no eliminan por sí solos la necesidad de soportes cuando la orientación local excede el ángulo crítico del proceso [2], [22].

Posicionadores comerciales. En la industria existen posicionadores 2-DOF (rotación y volteo) ofrecidos por fabricantes como ABB (Ver Figura 1.7), KUKA o Yaskawa. Para FDM, la literatura reporta limitaciones por sobredimensionamiento (pensados para soldadura y cargas elevadas) y coste/ecosistemas cerrados que restringen la interoperabilidad al usar buses y protocolos propietarios [2], [8].

Figura 1.7

Esquema y Componentes Principales de un Reductor Cicloidal



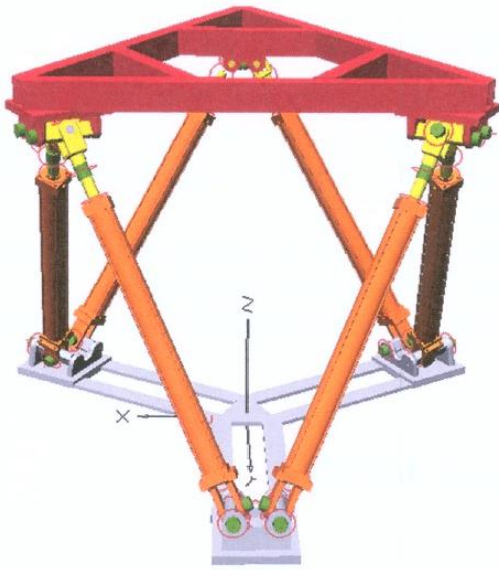
Nota: Posicionador con capacidad de carga de hasta 750 kg. Adaptado de [28].

Soluciones académicas.

- Mesas roto-basculantes (2-DOF). Topología ampliamente estudiada por su simplicidad mecánica y efectividad para reorientar la pieza durante la deposición. Se han reportado voladizos imprimibles hasta $\sim 100^\circ$ frente al límite planar de $\sim 45^\circ$, validando la reducción de soportes mediante reorientación dinámica [5].
- Robots paralelos (hexápodos/Plataforma Stewart). Ofrecen alta rigidez y 6-DOF adicionales, pero su complejidad de control y espacio de trabajo restringido limitan su aplicabilidad para piezas de tamaño variable frente al enfoque roto-basculante (Ver Figura 1.8) [29], [30].

Figura 1.8

Esquema de la Plataforma Stewart-Gough.



Nota: Ilustración de un robot paralelo de 6-DOF con base y plataforma móvil unidos por actuadores lineales. Adaptado de [31].

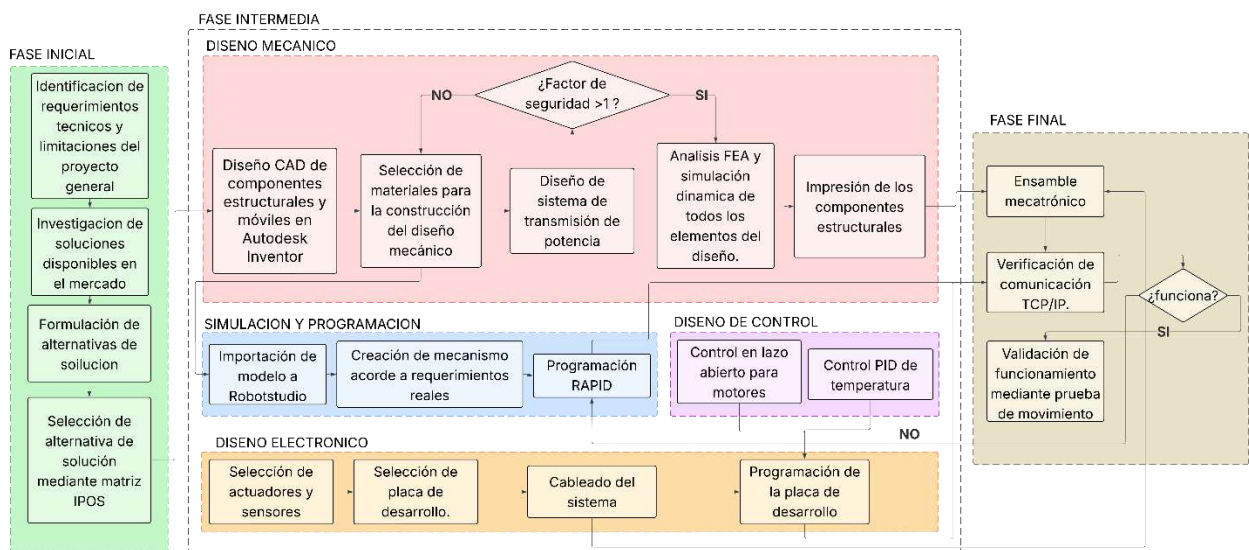
Capítulo 2

2. Metodología.

En este capítulo se detalla la metodología de diseño aplicada, la cual se ilustra gráficamente en la Figura 2.1. El desarrollo del posicionador se abordó desde la mecánica, electrónica, control, simulación y programación.

Figura 2.1

Diagrama de flujo de la metodología usada



Nota: Diagrama de flujo con todas las etapas del diseño mecatrónico.

2.1 Requerimientos y restricciones del sistema

Se definieron los requerimientos del posicionador según las necesidades del cliente y su integración con la controladora ABB.

2.1.1 Requerimientos funcionales y técnicos

Se establecieron los siguientes requerimientos técnicos y de funcionamiento:

Tabla 2.1*Requerimientos funcionales y técnicos del posicionador roto-basculante*

| Categoría | Requerimiento | Especificación / criterio |
|--------------|----------------------|---|
| Cinemática | Grados de libertad | 2 GDL rotacionales: rotación continua + basculación |
| Cinemática | Rango de movimiento | Rotación 360° continua; basculación $\pm 90^\circ$ |
| Mecánica | Capacidad de carga | Carga nominal: 1 kg |
| Actuación | Motores | Motores paso a paso |
| Térmico | Rango de operación | Control térmico para mantener 50–60 °C |
| Posición | Referencia de origen | Detectar posición “cero” |
| Interfaz | Señal de calibración | Botón HOME para moverse al punto 0,0 |
| Comunicación | Enlace con IRC5 | TCP/IP por sockets Arduino–ABB IRC5 |

Nota. Esta tabla resume los requerimientos técnicos establecidos.

2.1.2 Otros requerimientos

De manera complementaria, se consideraron requerimientos no técnicos enfocados en la reutilización del prototipo dentro del laboratorio. Se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.2*Requerimientos no técnicos del posicionador roto-basculante*

| Categoría | Requerimiento | Implicación en el diseño |
|-------------|-------------------------|--|
| Modularidad | Reemplazo de actuadores | Permitir cambio de motores sin rediseño del sistema. |

| | | |
|-------------------|---|--|
| Interoperabilidad | Uso con otros robots | Mantener comunicación compatible con Arduino (TCP/IP) para reutilización en distintas plataformas. |
| Escalabilidad | Expansión de entradas y salidas en sistema de control | Reservar capacidad para integrar sensores y actuadores adicionales en futuras iteraciones. |

Nota. Esta tabla resume los requerimientos no técnicos para el desarrollo del prototipo-

2.2 Alternativas de solución

Se formularon alternativas de solución con el objetivo de buscar un balance entre diseño, precio y funcionalidad.

2.2.1 Alternativas consideradas

Se presentan las alternativas consideradas:

- Roto-basculante (2 GDL): Una mesa de dos ejes rotacionales: un eje principal de rotación continua y un eje de basculación para inclinar la plataforma.
- Péndulo rotatorio (2 GDL): Mesa soportada a un brazo, en una junta tipo revoluta, y eje de rotación dentro del brazo.
- Plataforma tipo Stewart (6 GDL): Mecanismo paralelo capaz de orientar y posicionar la mesa con alta destreza.
- Posicionador comercial ABB/Terceros: Adquisición de un posicionador industrial.

2.2.2 Selección de solución adecuada

Para la evaluación de las alternativas de solución se utilizó una matriz de decisión IPOS, con los criterios:

- Capacidad de orientación (10%): Amplitud y utilidad práctica de la orientación para el objetivo del prototipo.
- Precio (40%): Costo de adquisición/implementación.
- Facilidad de mantenimiento e iteración (15%): Facilidad de modificación y mantenimiento.

- Facilidad de construcción mecánica (20%): Facilidad de fabricación y ensamble del prototipo o producto.
- Integración con la controladora (15%): Facilidad de integración con la controladora ABB.

Tabla 2.3

Matriz IPOS para la selección de la configuración del posicionador

| Criterio | Peso (%) | Roto-basculante (2 GDL) | Péndulo (2 GDL) | Stewart (6 GDL) | Posicionador Industrial ABB | Posicionador Comercial de terceros |
|--|----------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------------|
| Capacidad de orientación | 10 | 8.0 | 6.0 | 10.0 | 9.0 | 9.0 |
| Precio | 40 | 10.0 | 10.0 | 5.0 | 1.0 | 2.0 |
| Facilidad de mantenimiento e iteración | 15 | 9.0 | 9.0 | 4.0 | 2.0 | 2.0 |
| Facilidad de construcción mecánica | 20 | 8.0 | 7.0 | 3.0 | 10.0 | 10.0 |
| Integración con la controladora | 15 | 7.0 | 7.0 | 7.0 | 10.0 | 9.0 |
| Puntaje total (0–10) | 100 | 8.80 | 8.30 | 5.25 | 5.10 | 5.35 |

Nota. Se utilizó una escala de 0 a 10 (0 = muy deficiente, 10 = excelente). El puntaje total se calculó como suma ponderada: $\sum(\text{peso} \times \text{puntaje})$.

En base a los resultados de la matriz IPOS, se seleccionó la configuración roto-basculante de 2 GDL como solución final.

2.3 Diseño conceptual del posicionador roto-basculante

Para el diseño del posicionador roto-basculante de 2 GDL se tomó en cuenta su mecánica, electrónica y control. Para la definición inicial de la arquitectura mecánica, se tomó como referencia conceptual el diseño del mecanismo del proyecto de código abierto "Voron Trident 5 axis" [32], ideado originalmente para impresoras 3D de cinemática cartesiana de 3 ejes.

2.3.1 Diseño mecánico

Siguiendo la metodología estándar de diseño mecánico, se implementó un proceso iterativo: se partió de un dimensionamiento basado en cálculos analíticos, seguido de una validación mediante simulaciones. Aquellos componentes que no cumplieran con los criterios de seguridad fueron rediseñados y reevaluados hasta garantizar su desempeño óptimo.

Diseño y de piezas estructurales y móviles: El primer paso del diseño mecánico es modelar las piezas que van a ser usadas para el diseño estructural. Se realizaron diferentes diseños de estructuras y piezas. Para luego ser validados y llegar hasta el resultado final.

Materiales: El cliente proporcionó extrusiones de aluminio y una máquina de impresión 3D para poder fabricar las piezas. Por lo cual se utilizó una combinación de estos materiales a la hora de crear la estructura y la parte móvil del diseño.

Sistema de transmisión de potencia: Se optó por un sistema de correas síncronas GT2 por su precisión, priorizando su disponibilidad comercial y estandarización en impresión 3D. Este mecanismo garantiza la reducción del juego mecánico y vibraciones, adecuándose a los actuadores provistos por el cliente:

- Motor paso a paso NEMA 23 con torque de retención nominal $T_{nom} \approx 1.0$ Nm.
- Motor paso a paso NEMA 17, con torque de retención nominal $T_{nom} \approx 0.2$ Nm.

Requerimiento de Torque: Para ejes de rotación, el torque requerido se modela como:

$$T_{total} = T_{gravitacional} + T_{inerencia} + T_{fricción} \quad (2.1)$$

El torque gravitacional se calcula con la siguiente ecuación, en la cual m es la masa, g es la aceleración de la gravedad y d es el brazo de palanca.

$$T_{grav} = m * g * d \quad (2.2)$$

El torque de inercia se calcula con la siguiente ecuación, en la cual J es el momento de inercia y α es la aceleración angular que se modela como 4 rad/s^2 debido a la naturaleza de precisión del sistema.

$$T_{\text{inercia}} = J \cdot \alpha \quad (2.3)$$

El momento de inercia de la masa, para la simplificación de los cálculos, se usaron dos modelos básicos, el de cilindro recto y el de hemisferio. El hemisferio se usó para el sistema de basculación y el de cilindro para el sistema de rotación. Formulas donde m es masa y r es el radio.

$$J_{\text{cilindro}} = \frac{1}{2} m \cdot r^2 \quad (2.4)$$

$$J_{\text{hemisferio}} = \frac{2}{5} m \cdot r^2 \quad (2.5)$$

Obtención de torques requeridos: Para determinar el torque requerido τ_{req} en ambos ejes, se realizó el cálculo analítico, para su posterior validación con la simulación dinámica en Autodesk Inventor. Como primer paso, se asignaron los materiales correspondientes a cada pieza del diseño CAD; esto permitió obtener con precisión la masa y las propiedades inerciales del conjunto. A partir de estos datos, se aplicaron las ecuaciones de dinámica rotacional previamente definidas.

Posteriormente, se procedió al dimensionamiento del sistema de transmisión de potencia. Este diseño se rigió bajo el criterio de cumplir con un factor de seguridad mínimo de 4, valor recomendado para asegurar la fiabilidad en sistemas móviles bajo carga. Para esta validación se utilizó la siguiente relación:

$$FS = \frac{T_{\text{disponible}}}{T_{\text{requerido}}} \geq 4 \quad (2.5)$$

Para obtener el valor objetivo de torque, mediante el uso del factor de seguridad se usó el siguiente cálculo:

$$T_{objetivo} = FS * T_{requerido} \quad (2.6)$$

Posteriormente, para obtener la reducción mínima:

$$i = \frac{T_{objetivo}}{T_{motor}} \quad (2.7)$$

Una vez definida la relación de transmisión, se validó la selección comercial de la banda GT2 de 6 mm de ancho bajo la norma ISO 5296. Considerando el torque operativo de 1.2 Nm en el eje de carga y una polea de 80 dientes, se determinó la fuerza tangencial efectiva:

$$F = \frac{2 \times \tau}{D_p} \quad (2.8)$$

Primero obtenemos el valor del diámetro de paso aproximado, estimando una polea de 80 dientes para la reducción y el Paso de 2mm de la banda GT2.

$$D_{paso} = \frac{P \times Z_{out}}{\pi} = \frac{2 \times 80}{3.1416} \approx 50.93 \text{ mm} \quad (2.9)$$

Ahora el radio:

$$r = \frac{50.93 \text{ mm}}{2} = 25.465 \text{ mm} \quad (2.10)$$

Posteriormente calculamos

$$F = \frac{\tau_{salida}}{Radio_{salida}} = \frac{1.2 \text{ Nm}}{0.0254 \text{ m}} \approx 47.1 \text{ N} \quad (2.11)$$

Según los manuales de diseño industrial Gates Corporation, la tensión de trabajo admisible para una banda de 6 mm es de 111 N [33].

Al comparar ambos valores, se obtiene un factor de seguridad operativo para la correa:

$$FS_{banda} = \frac{111 \text{ N}}{47.15 \text{ N}} \approx 2.35 \quad (2.12)$$

Este resultado confirma que la banda de 6 mm es capaz de transmitir las cargas de diseño sin riesgo de elongación plástica o ruptura.

Validación de componentes mecánicos impresos por FDM (FEA): Dada la anisotropía inherente a la manufactura FDM, se verificó la integridad estructural de los soportes en PLA mediante un análisis de elementos finitos sometido a un escenario de sobrecarga crítica.

Se definió un caso de carga mayorado aplicando:

- Carga vertical F_y , que representó el peso nominal de la mesa con carga.
- Carga axial F_z , para simular la tensión de las correas y posibles desalineaciones.

Las propiedades del material se definieron de forma conservadora para representar una pieza FDM:

- Material: PLA (configuración personalizada para impresión FDM).
- Límite de fluencia: 19 MPa.
- Módulo de Young: 1.2 GPa.
- Coeficiente de Poisson 0.35
- Densidad 0.372 g/cm³

Para la verificación de los componentes mediante simulación se sugiere un factor de seguridad del orden de 2.

2.3.2 Diseño electrónico

El sistema electrónico se estructuró en base a los componentes recibidos por el cliente. Posteriormente se siguió un flujo secuencial enfocado en encontrar los componentes a usar, y la suficiencia energética y estabilidad en la comunicación con el controlador industrial.

Selección de actuadores, controladores y sensores

En esta etapa se validaron los componentes electrónicos capaces de cumplir con los requerimientos de diseño.

Elemento calefactor y sensor de temperatura: Para asegurar la adhesión de la primera capa en impresión FDM, es requisito indispensable alcanzar una temperatura de cama de 60°C. Se seleccionó una almohadilla térmica que integra un termistor NTC 100k; este componente, estándar en la industria 3D, permite una implementación eficiente del lazo de control de temperatura.

Controladora de motores a pasos: Se optó por controladores TB6600 debido a su capacidad para manejar picos de corriente de hasta 4.0 A y su disipación térmica eficiente. Esto asegura que los motores operen de manera continua sin sobrecalentamiento, superando las limitaciones de drivers compactos convencionales.

Sensores de posición: Para los extremos del eje de basculación, se seleccionaron interruptores electromecánicos de contacto (finales de carrera). Se optó por esta tecnología debido a su robustez y simplicidad para actuar como "parada de emergencia física". Su función principal es proteger la integridad del cableado y la estructura mecánica, y sirve como referencia para conocer que el posicionador ya está en el punto más alto de operación. Para la detección del punto medio, se implementó un sensor óptico activado por interrupción de haz de luz infrarroja. La justificación de usar un sensor óptico en lugar de uno mecánico radica en la necesidad de alta repetibilidad y ausencia de desgaste mecánico. Esto garantiza que la rutina para establecer el origen del sistema tenga la máxima precisión posible en cada inicio de operación.

Unidad de Procesamiento: Se optó por una placa de desarrollo basada en microcontrolador (arquitectura Arduino Mega 2560). Esta plataforma ofrece la cantidad necesaria de pines digitales (I/O) para manejar dos drivers y la gestión térmica simultáneamente, además de contar con soporte nativo para librerías de comunicación Ethernet (SPI) requeridas para el enlace TCP/IP con el robot ABB.

Metodología de diseño y cálculos

Para garantizar la precisión en la lectura de temperatura de la cama caliente, el diseño de la etapa del sensor se centró en maximizar la resolución del convertidor analógico-digital (ADC) del microcontrolador dentro del rango operativo crítico. El comportamiento resistivo del sensor (Termistor NTC) se modeló matemáticamente utilizando la ecuación Beta, la cual relaciona la resistencia con la temperatura absoluta:

$$R_T = R_{25} \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}} \right)} \quad (2.13)$$

Donde R_T es la resistencia a la temperatura T , R_{25} es la resistencia nominal a 25°C y β es el coeficiente característico del material.

Para la linealización y lectura de esta señal, se implementó una configuración de divisor de voltaje. El criterio de diseño para seleccionar la resistencia fija se basó en el principio de máxima sensibilidad del ADC, el cual establece que la mayor variación de voltaje por grado de temperatura se obtiene cuando la impedancia del divisor iguala a la del sensor en el punto de operación objetivo:

$$R_{\text{fija}} \approx R_{T(@50^\circ\text{C})} \quad (2.14)$$

De esta manera, se garantiza que el voltaje de salida se ubique en el centro del rango dinámico del ADC durante la temperatura de impresión, minimizando el error de cuantización y la influencia del ruido eléctrico.

Dimensionamiento de la fuente de alimentación

La potencia total requerida P_{total} se estimó sumando las cargas máximas simultáneas del sistema:

$$P_{total} = P_{cama} + P_{motores} + P_{control} \quad (2.15)$$

Para determinar la capacidad de la fuente comercial, se aplicó un Factor de Seguridad (FS) sobre la potencia calculada, con el fin de asegurar que el suministro opere en una zona de alta eficiencia y evitar el estrés térmico en los componentes de potencia:

$$P_{fuente} \geq P_{total} * (1 + \% \text{ Margen}) \quad (2.16)$$

Estrategia de eficiencia energética y regulación

Para la alimentación de la etapa lógica y de control (5V) a partir del bus principal de 24V, se realizó un análisis comparativo de disipación de potencia. Se descartó el uso de regulación lineal tradicional debido a que la potencia disipada en forma de calor resulta excesiva ante la caída de tensión requerida:

$$P_{perdida} = (V_{in} - V_{out}) \cdot I_{carga} \quad (2.17)$$

Dado que esta pérdida energética implicaría la necesidad de disipadores voluminosos y reduciría la eficiencia global del equipo, la metodología de diseño estableció el uso de una topología de conversión DC-DC conmutada. Esta configuración permite mantener una eficiencia energética superior al 90%, garantizando la estabilidad térmica del sistema de control sin elementos pasivos de disipación.

2.3.3 Diseño de control

La estrategia de control se dividió en dos subsistemas independientes según la naturaleza de la variable física a regular: un control en lazo cerrado para la estabilidad térmica y un control en lazo abierto con validación discreta para el posicionamiento.

Metodología de control térmico (PID)

Para la regulación de temperatura de la cama caliente, se implementó un algoritmo de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID). El objetivo fue minimizar el error en estado estacionario y evitar oscilaciones térmicas que afecten la adhesión de la pieza durante la impresión.

La acción de control $u(t)$ se define matemáticamente como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.18)$$

Donde $e(t)$ representa la diferencia entre la temperatura deseada y la lectura actual del termistor.

Procedimiento de Sintonización

La determinación de las ganancias (K_p, K_i, K_d) siguió una metodología iterativa basada en el análisis de la respuesta al escalón del sistema térmico: Como punto de partida, se cargaron los parámetros estándar predefinidos en el firmware Marlin para camas calientes MK3. Estos valores, basados en modelos térmicos genéricos de impresoras 3D, sirvieron como estimación inicial para evitar inestabilidad severa en la primera prueba. El proceso de sintonizar el controlador es de aplicar una perturbación tipo escalón y se ajustaron las ganancias secuencialmente observando la curva de respuesta:

- Ajuste de K_p (Proporcional): Se incrementa para mejorar el tiempo de subida, buscando una respuesta rápida sin oscilación excesiva.

- Ajuste de K_d (Derivativo): Se introduce para amortiguar el sobre impulso causado por la inercia térmica de la cama.
- Ajuste de K_i (Integral): Finalmente, se ajusta el término integral para eliminar el error de estado estacionario.

2.3.4 Estrategia de control de movimiento

Para los ejes de rotación y basculación, se optó por un esquema de control en Lazo Abierto, aprovechando la naturaleza discreta de los motores paso a paso que permite un posicionamiento preciso sin necesidad de codificadores rotativos continuos, simplificando la arquitectura electrónica.

Sin embargo, para mitigar la incertidumbre de la posición absoluta inherente al lazo abierto, se implementó un sistema de retroalimentación discreta de posición:

Calibración de Origen: Mediante el opto interruptor ubicado en la coordenada (0,0), el sistema ejecuta una rutina de búsqueda de cero cada vez que se enciende. Esto elimina el error acumulativo previo y establece una referencia absoluta fiable para el conteo de pasos.

Delimitación de Espacio de Trabajo: Los finales de carrera ubicados en los extremos de la trayectoria, actúan como sensores de retroalimentación de seguridad. Aunque no intervienen en la trayectoria normal, confirman al controlador que se ha alcanzado el límite físico permitido, evitando daños mecánicos por comandos erróneos.

2.3.5 Diseño de programación y simulación

La metodología de software se centró en la creación de un gemelo digital dentro del entorno ABB RobotStudio. El objetivo fue validar el funcionamiento del posicionador en un entorno virtual seguro. Además, de utilizar la controladora virtual del software para comandar el prototipo físico en tiempo real. Para finalmente validar la programación usando la controladora real.

Importación y creación del mecanismo virtual

Para la importación del mecanismo se realizó una optimización de las geometrías a usar en el mecanismo. Primero se realizó la agrupación de los objetos fijos y estructurales, luego se fijaron los objetos móviles del eje de basculación, y luego los objetos móviles del eje de rotación. Con estas tres geometrías se definió la cadena cinemática del posicionador, estableciendo las relaciones padre hijo entre los eslabones, y asignando los límites articulares de los mismos.

Programación RAPID

La lógica de control se desarrolló en el lenguaje nativo de ABB (RAPID), configurando al controlador IRC5 (virtual) como el cliente del sistema.

- Sincronización con posicionador real: Se vincularon las señales de salida de la Controladora Virtual a las articulaciones del modelo 3D. De esta manera, al ejecutar el código, la instrucción RAPID actualiza visualmente la posición en RobotStudio y, simultáneamente, transmite el comando al prototipo físico, logrando un movimiento coordinado entre la simulación y la realidad.

Figura 2.2

Diagrama de flujo de la programación Rapid



Nota: Diagrama de flujo con la programación de la controladora ABB.

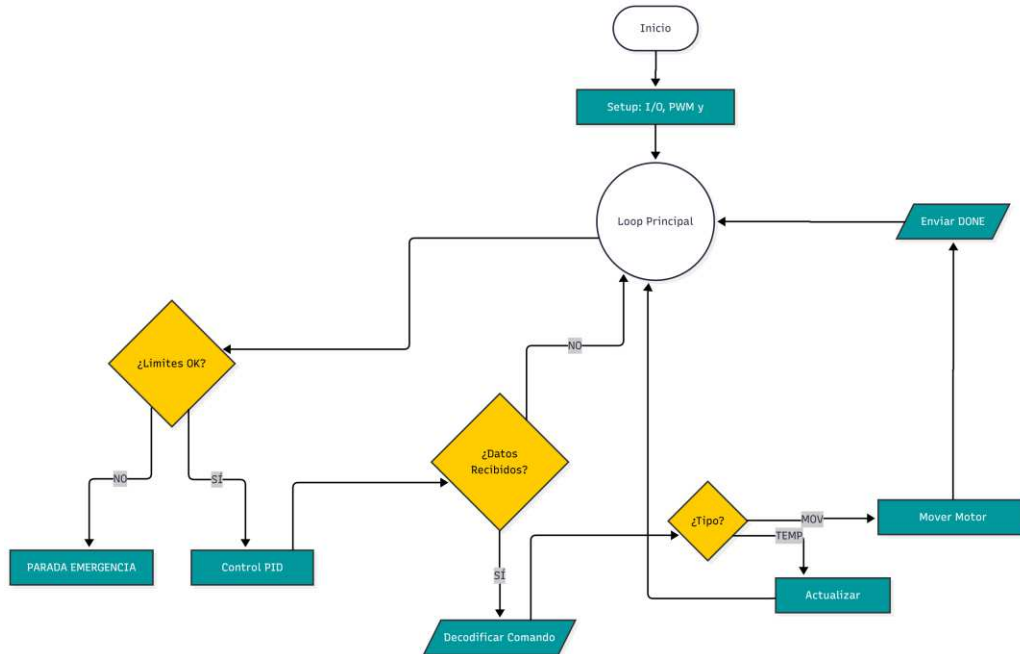
Programación Arduino

La programación complementaria se realizó en el Arduino Mega, para el cual se utilizó una Shield Ethernet para poder realizar la comunicación TCP/IP con la controladora ABB.

- Entradas y salidas: Se definieron y configuraron los pines digitales y analógicos necesarios para la operación del hardware. Como salidas digitales se asignaron los pines de control (STEP, DIR, ENABLE) para los drivers de los motores paso a paso y una salida PWM para la modulación de potencia de la cama caliente. Como entradas se configuraron los puertos para la lectura de los dos finales de carrera mecánicos, el sensor opto interruptor para el cero absoluto y la entrada analógica para el termistor NTC.
- Recepción y ejecución de comandos: Se implementó una lógica de servidor TCP que escucha permanentemente el puerto Ethernet. Al recibir una trama de datos, el firmware ejecuta una rutina para decodificar la instrucción. Las acciones de movimiento son bloqueantes: el sistema ejecuta la trayectoria física completa y, únicamente al finalizar, envía una señal de confirmación al controlador, garantizando la sincronización.
- Control: La arquitectura de software integra dos módulos independientes: un sistema de movimiento en lazo abierto que genera perfiles de velocidad trapezoidales para mitigar efectos inerciales y evitar la pérdida de pasos, y un lazo de control térmico PID que regula dinámicamente el ciclo de trabajo del MOSFET para mantener la temperatura objetivo.

Figura 2.3

Diagrama de flujo de la programación Arduino



Nota: Diagrama de flujo de la programación Arduino.

2.3.6 Integración y validación del sistema

En esta etapa se procedió a la consolidación física del posicionador y a la verificación sistemática de su comportamiento frente a los requerimientos técnicos y funcionales establecidos en la fase inicial. La validación se estructuró en tres niveles: integridad física, estabilidad de enlace y precisión operativa.

Ensamble mecatrónico e integración de sistemas

Se llevó a cabo el montaje físico siguiendo los diseños validados en las etapas de diseño mecánico y electrónico. Este proceso incluyó:

- Integración Mecánica: Montaje de perfiles de aluminio, piezas fabricadas mediante impresión tridimensional y sistemas de transmisión por correas, verificando la alineación de ejes y la tensión para evitar juegos mecánicos.

- Integración Electrónica: Conexión final de los actuadores, sensores y sistema térmico hacia la placa de desarrollo, asegurando el aislamiento de las señales de control frente a las de potencia.
- Puesta en marcha técnica: Verificación de continuidad eléctrica, niveles de voltaje y sentido de giro de los motores antes de cargar el programa definitivo.

Verificación de la comunicación industrial por protocolo de red

Para garantizar la capacidad de trabajo conjunto con otros equipos, se sometió al sistema a pruebas de conectividad entre la unidad de control industrial y el microcontrolador. Esta fase consistió en:

- Prueba de enlace de datos: Validación del intercambio de paquetes de información entre el entorno virtual y la tarjeta de red mediante el uso de puertos de comunicación de datos.
- Validación de tiempo de respuesta y sincronismo: Se verificó que las señales de confirmación de movimiento finalizado se recibieran correctamente antes de ejecutar la siguiente instrucción, evitando colisiones o desfases entre el modelo virtual y el prototipo real.

Protocolo de validación operativa (Pruebas de movimiento)

La fase final culminó con la validación de los objetivos del proyecto mediante pruebas de rendimiento real. Se establecieron los siguientes criterios de aceptación:

- Validación Cinemática: Comprobación de que el posicionador alcanza los rangos de 360° en rotación y $\pm 90^\circ$ en inclinación definidos en los requerimientos iniciales. A su vez probar la precisión en movimientos de 1, 5 y 10 grados.
- Prueba de repetibilidad de origen: Ejecución reiterada de la rutina de retorno a la posición inicial para medir la precisión del sensor óptico y los sensores de límite de carrera.
- Prueba de carga y par motor: Operación del sistema con la carga nominal de 1 kg para verificar que la fuerza de los motores sea suficiente bajo condiciones de movimiento, sin pérdida de pasos.

- Estabilidad Térmica: Monitoreo del algoritmo de control para asegurar que la plataforma alcance y mantenga el rango de 50–60 °C con un error mínimo.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

Se presentan los resultados de la validación del diseño mecatrónico, abarcando desde la simulación hasta la integración física de los subsistemas para verificar el cumplimiento de los requerimientos. Adicionalmente, se exponen las pruebas operativas finales, el análisis de costos y las limitaciones del prototipo.

3.1 Resultados del diseño mecánico

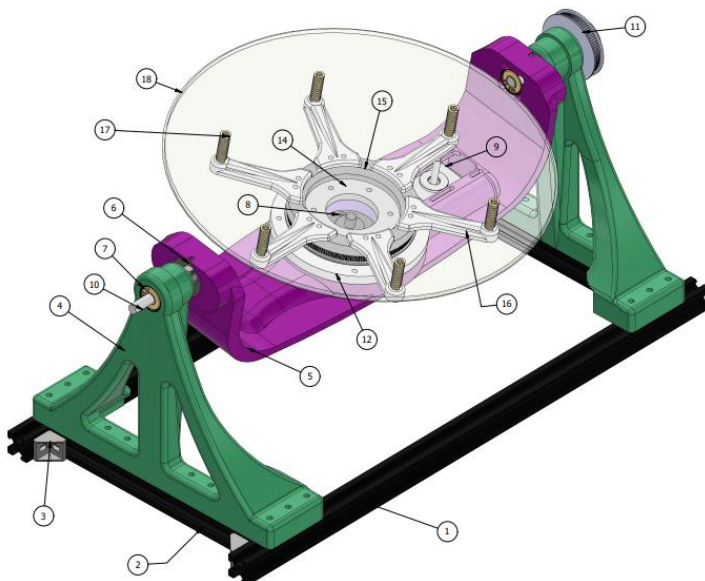
Los resultados finales de la mecánica del posicionador, obtenidos tras la aplicación de la metodología de diseño y validación se detallan en la evolución del proceso de diseño. Desde el modelo virtual hasta la integración física, verificando la integridad estructural y la capacidad funcional del sistema mediante los siguientes puntos

3.1.1 Modelamiento de piezas en software CAD

El modelado tridimensional y el ensamble virtual de los componentes se desarrollaron utilizando el software Autodesk Inventor. A continuación, el ensamble correspondiente a la estructura mecánica.

Figura 3.1

Ensamble del prototipo en Autodesk Inventor



Nota: Imagen del ensamble del prototipo final visto desde Autodesk Inventor con sus respectivas etiquetas. En la tabla 3.1 se detallan las partes del mismo.

Tabla 3.1

Tabla de elementos del ensamble

| Elemento | Cantidad | N.º de Pieza | Descripción |
|-----------------|-----------------|-----------------------------|---|
| 1 | 2 | Perfil2020 500mm | Perfiles de aluminio cortados |
| 2 | 2 | Perfil2020 210mm | Perfiles de aluminio cortados |
| 3 | 8 | Unión L perfil2020 | Pieza de unión en L para perfiles 2020 |
| 4 | 2 | Soporte lateral | Base para la hamaca central |
| 5 | 1 | Hamaca Central | Base de todo el mecanismo basculante |
| 6 | 2 | Acople para ejes 8mm | Retenedores de eje de 8mm |
| 7 | 3 | Rodamiento_608ZZ | Rodamientos Comerciales |
| 8 | 1 | Anillo Colector | Pieza necesaria para mover cables rotativamente |
| 9 | 1 | Stepping_Motor_Nema17_Main | Motor del eje central |
| 10 | 2 | Eje 8mm diámetro 90mm largo | Eje cromado |
| 11 | 1 | GT2_80T_8mm_Bore_Pulley | Polea para eje basculante |
| 12 | 1 | Rodamiento Lazy Suzan | Rodamiento central de anillo |
| 13 | 1 | Conector Polea Central | Conector entre rodamiento y estructura |

| | | | |
|----|---|------------------------------|---|
| 14 | 1 | Acople Polea Central | Acople para sostener la mesa rotatoria |
| 15 | 1 | Polea Central | Polea para el movimiento rotatorio |
| 16 | 6 | Soportes Cama | Soportes tipo ala para sostener la mesa |
| 17 | 6 | Resortes niveladores de cama | Calibración de cama |
| 18 | 1 | Cama | Área de impresión |

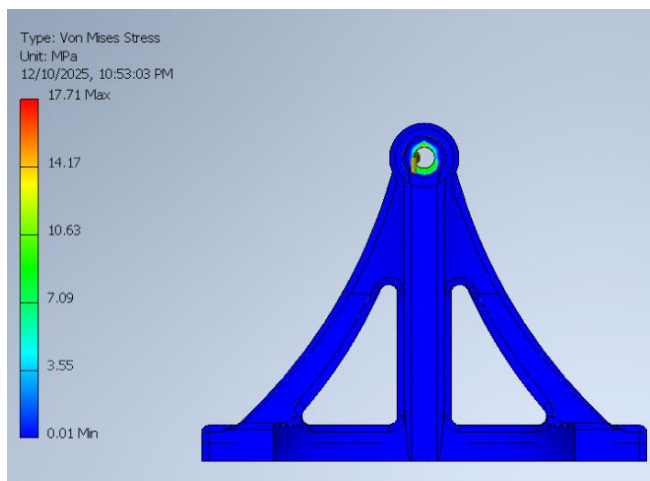
Nota: Tabla de los elementos usados en el ensamble mecánico del prototipo.

3.1.2 Análisis estructural y simulación dinámica

Los análisis de elementos finitos y la validación de los factores de seguridad bajo cargas críticas se pueden revisar a continuación. Con base a la metodología, la mayoría de las piezas se trabajaron bajos parámetros físicos del PLA y PETG, donde los análisis se realizaron a las piezas impresas para verificar su fiabilidad.

Figura 3.2

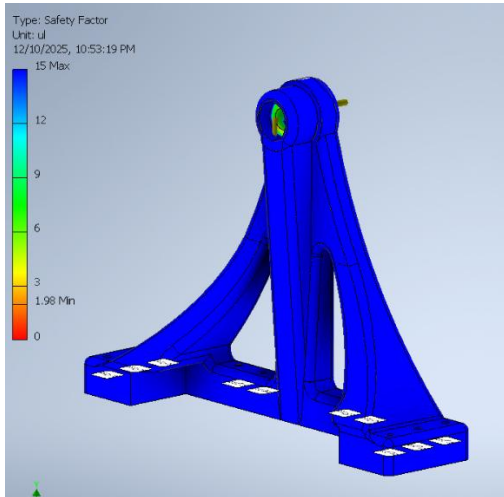
Análisis de esfuerzo de Von Mises para la pieza: Soporte Lateral.



Nota: Se observan concentraciones de esfuerzos en la ranura circular.

Figura 3.3

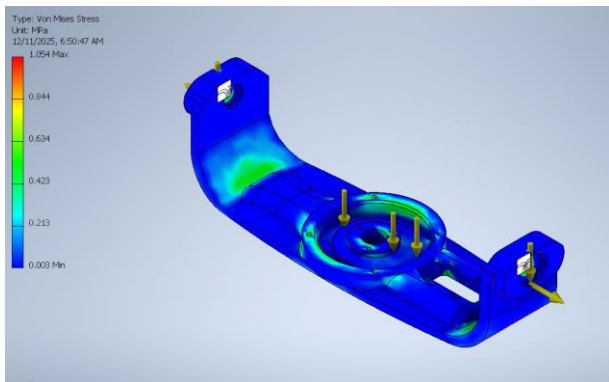
Análisis del factor de seguridad para la pieza: Soporte Lateral.



Nota: En la imagen se denota que el factor de seguridad mínimo para esta pieza es de 1.98.

Figura 3.4

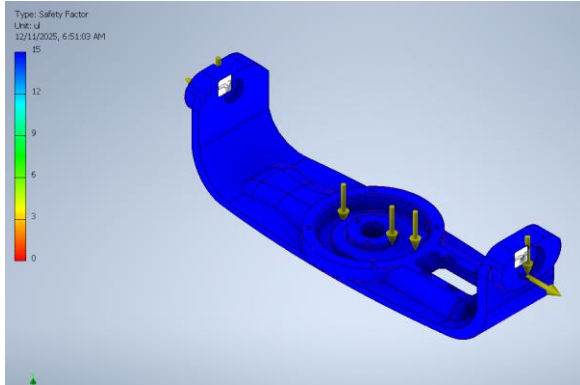
Análisis de estrés de Von Mises para la pieza: Hamaca.



Nota: Distribución de esfuerzos de Von Mises. Se observan concentraciones de tensión críticas en la transición horizontal-vertical y en las superficies de soporte de carga.

Figura 3.5

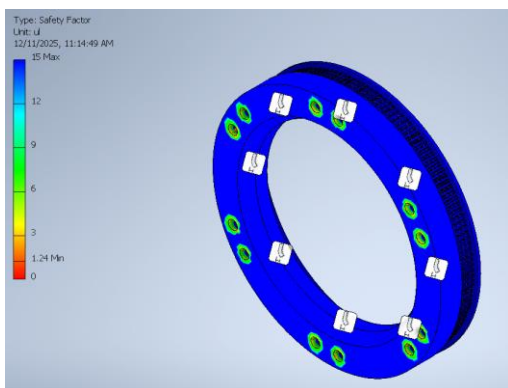
Análisis del factor de seguridad para la pieza: Hamaca.



Nota: Para esta pieza, el factor de seguridad es de más de 15 unidades.

Figura 3.6

Análisis del factor de seguridad para la pieza: Conector de transición.



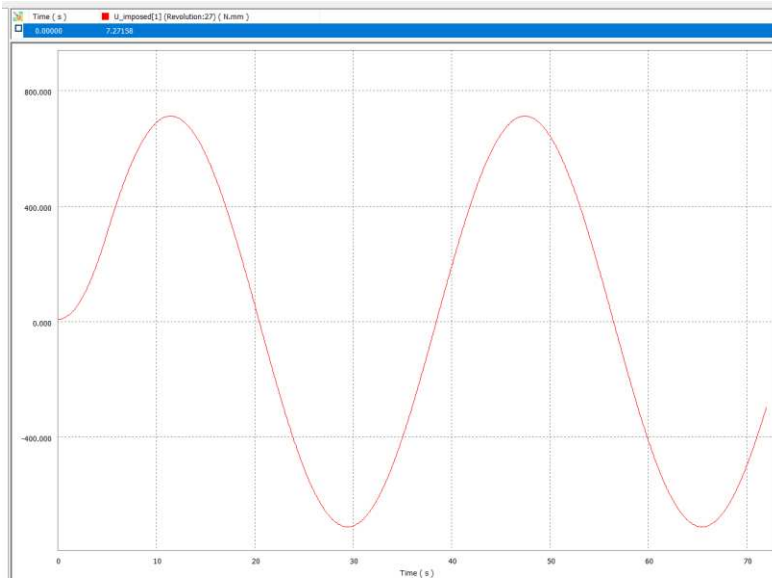
Nota: Esta pieza fundamental para el soporte de la base rotatoria tiene un factor de seguridad mínimo de 1.24.

Con base en el análisis de elementos finitos, se confirma que los componentes estructurales garantizan la integridad mecánica del sistema, operando dentro de los márgenes de seguridad establecidos.

Paralelamente, la simulación dinámica permitió cuantificar con precisión los pares de torsión demandados en los ejes de rotación y basculación. Al contrastar estos resultados computacionales con el modelo analítico desarrollado en la metodología, se valida el dimensionamiento de los actuadores bajo condiciones operativas.

Figura 3.7

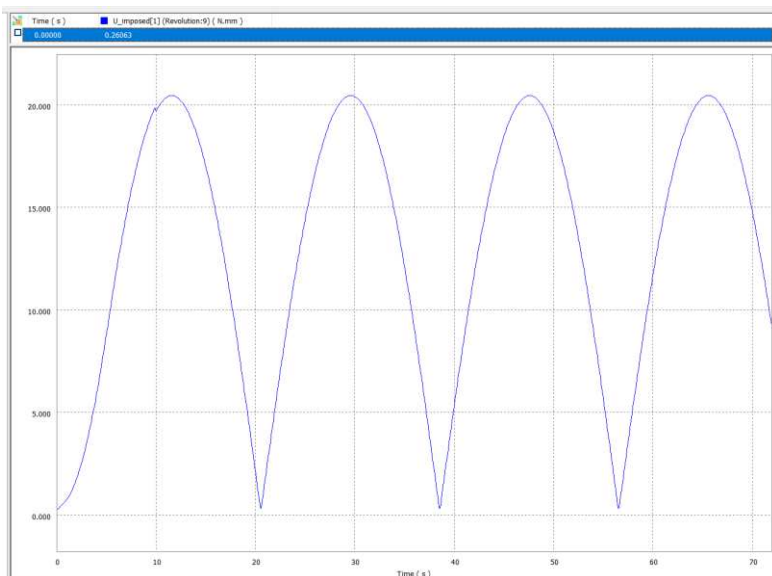
Análisis dinámico del movimiento de basculación, variable graficada: Torque aplicado por el motor Eje A.



Nota: La gráfica muestra que el motor debe de actuar con un torque de ± 0.8 Nm.

Figura 3.8

Análisis dinámico del movimiento de basculación, variable graficada: Torque aplicado por el motor Eje B.



Nota: La gráfica muestra que el motor debe de actuar con un torque de ± 0.02 Nm.

Tabla 3.2

Tabla de resultados del Torque requerido.

| Eje | Calculo Analítico | Resultados de Simulación | Error Relativo (%) |
|------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------|
| A (Eje de basculación) | 1 Nm | 0.8Nm | 20.00 % |
| B (Eje de rotación) | 0.028Nm | 0.02Nm | 28.57 % |

Nota: Diferencia de error relativo entre calculo teórico y simulación.

El hecho de que el torque simulado (0.8 Nm) sea inferior al torque de diseño analítico (1 Nm) valida que los actuadores seleccionados están sobredimensionados de manera segura. Esto garantiza que el sistema real tendrá la capacidad suficiente para operar.

3.1.3 Integración de actuadores y sistema de transmisión de potencia

La implementación física de los actuadores validó el diseño CAD, mediante el ensamble en la vida real del mismo. Para el sistema de transmisión de potencia se logró un acople mecánico rígido y sin holguras. Para el eje de basculación (Eje A), se instaló exitosamente el motor NEMA 23, fijándolo mediante un soporte personalizado fabricado en PLA. En el ensamblaje, esta pieza impresa demostró integridad estructural para soportar el peso del subensamble sin presentar flexión visible, validando la selección del material y los parámetros de impresión.

Figura 3.9

Imagen del motor NEMA 23.



Nota: Montaje final del actuador del eje de basculación.

En el sistema de rotación, la instalación del motor NEMA 17 se completó asegurando su alineación sobre la estructura. Este montaje proporcionó la rigidez para aplicar el torque de **0.2 Nm** hacia el sistema que sostiene el plato giratorio.

Figura 3.10

Imagen del motor NEMA 17.



Nota: Montaje final del actuador del eje de rotación.

El sistema de transmisión se ensambló según las especificaciones de diseño, estableciendo las relaciones de reducción mecánica necesarias para vencer la carga gravitacional e inercial. Esta configuración final asegura la multiplicación efectiva del par motor, garantizando la operatividad

del sistema bajo el factor de seguridad establecido ($FS \geq 2$). Los detalles técnicos de los componentes integrados se presentan a continuación:

Tabla 3.3

Tabla descriptiva de los parámetros de transmisión de potencia.

| Componente | Parámetro | Eje A (Basculación) | Eje B (Rotación) |
|------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|
| Correa Síncrona | Tipo / Perfil | GT2 (Paso 2mm) | GT2 (Paso 2mm) |
| | Ancho Nominal | 6 mm | 6 mm |
| | Longitud de Bucle | 300 mm | 400 mm |
| Polea Motriz | Nº Dientes | 20 dientes | 20 dientes |
| Polea Conducida | Nº Dientes | 80 dientes | 160 dientes |
| Transmisión | Relación | 4: 1 | 8: 1 |

Nota: Parámetros del sistema de transmisión de potencia.

Figura 3.11

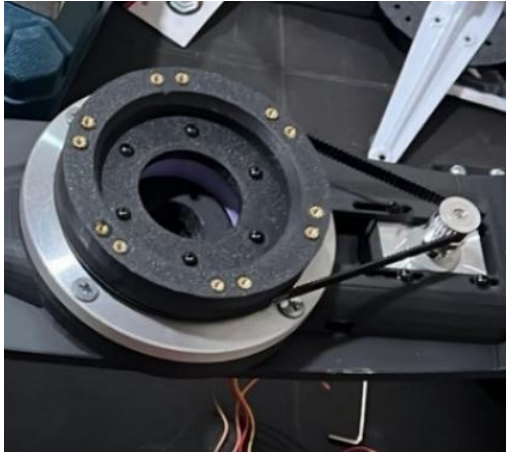
Imagen del motor NEMA 23 acoplado a su sistema de transmisión de potencia.



Nota: Montaje acoplado del actuador a la mesa.

Figura 3.12

Imagen del motor NEMA 17 acoplado a su sistema de transmisión de potencia.



Nota: Montaje acoplado del actuador del eje de rotación.

3.1.4 Tabla de componentes mecánicos

Como resultado de la etapa de selección y dimensionamiento, se consolidó la lista de materiales necesaria para la construcción física del posicionador. En la Tabla 3.4 se detallan los componentes mecánicos estandarizados y fabricados que integran el subsistema de movimiento, seleccionados bajo criterios de disponibilidad comercial y facilidad de reemplazo.

Tabla 3.4

Tabla de los componentes mecánicos.

| Componente | Especificación / Material | Cantidad | Función en el sistema |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------|---|
| Estructura | Perfiles de Aluminio | 2*450mm | Proveer rigidez estructural |
| Base | (Extrusiones estandarizadas 2020) | 2*210mm | |
| Soportes laterales | PLA | 2 | Alojamiento de rodamientos, sujeción de acople de ejes para hamaca central. |
| Hamaca central | PLA | 1 | Base para los componentes del eje B |

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------------|---|
| Actuador de Rotación | Motores de paso Nema 17 y 23 | 2 | Proveer movimiento rotatorio continuo a la plataforma superior. |
| Transmisión de Potencia | Correas Síncronas GT2 y Poleas dentadas | 1 kit | Transmitir movimiento con precisión |
| Rodamientos | Rodamientos rígidos de bolas 608-2RS | 6 | Permitir el giro suave de los ejes y soportar cargas radiales. |
| Plato central | Plato de aluminio de 300mm de diámetro y 2mm de grosor | 1 | Superficie de impresión |
| Lazy Suzan | Rodamiento axial en forma de anillo de aluminio | 1 | Permite el giro del mecanismo B reduciendo la fricción, capacidad máxima de 50 kg |
| Elementos de Fijación | Tornillería métrica (M3, M4, M5) e insertos de latón para impresión 3D | 1 kit de elementos de fijación. | Ensamble general y anclaje de componentes a la perfilera. |

Nota: *Tabla de elementos mecánicos.*

3.1.5 Impresión 3D de piezas estructurales

La fabricación de los componentes estructurales se realizó mediante tecnología FDM, utilizando PLA como material base. Para las piezas críticas, como la hamaca, se priorizó la integridad mecánica sobre la velocidad de fabricación. Se configuró una densidad de relleno del 30% con patrón de giroide. Esta configuración resultó en tiempos de manufactura prolongados (60 horas) pero garantizó una pieza robusta capaz de soportar las cargas de torsión sin presentar delaminación entre capas.

Tabla 3.5

Tabla de elementos impresos en 3D.

| Componente | Material | Relleno (%) | Tiempo de Impresión |
|------------|----------|-------------|---------------------|
| Hamaca | PLA | 30% | 60 h |

| | | | |
|-------------------------------------|------|-----|------|
| Soportes Laterales | PLA | 30% | 24 h |
| Acople Polea Central | PLA | 30% | 5 h |
| Polea Central | PLA | 50% | 7 h |
| Soportes del sistema de calibración | PLA | 15% | 2 h |
| Conector Central | PLA | 30% | 5 h |
| Soporte de la cama | PETG | 50% | 24 h |

Nota: *Tabla de elementos impresos en 3D.*

Figura 3.13

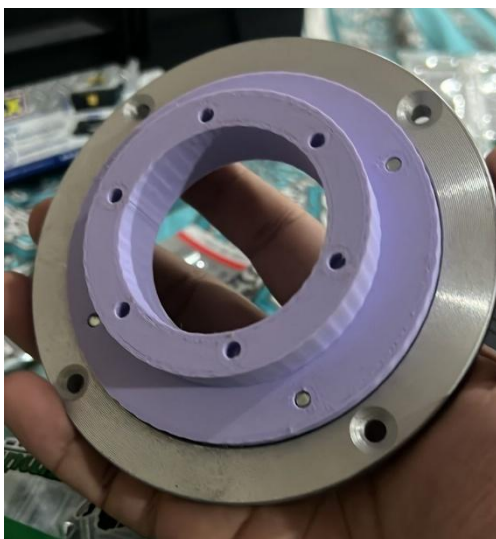
Proceso de impresión 3D de la hamaca.



Nota: *Figura donde se muestra a la hamaca siendo impresa en 3D.*

Figura 3.14

Impresión 3D del acople central.



Nota: *Figura donde se muestra el subensamble del acople central con el rodamiento Lazy Susan.*

Figura 3.15

Impresión 3D de los soportes laterales.



Nota: Figura donde se muestra la impresión del soporte lateral.

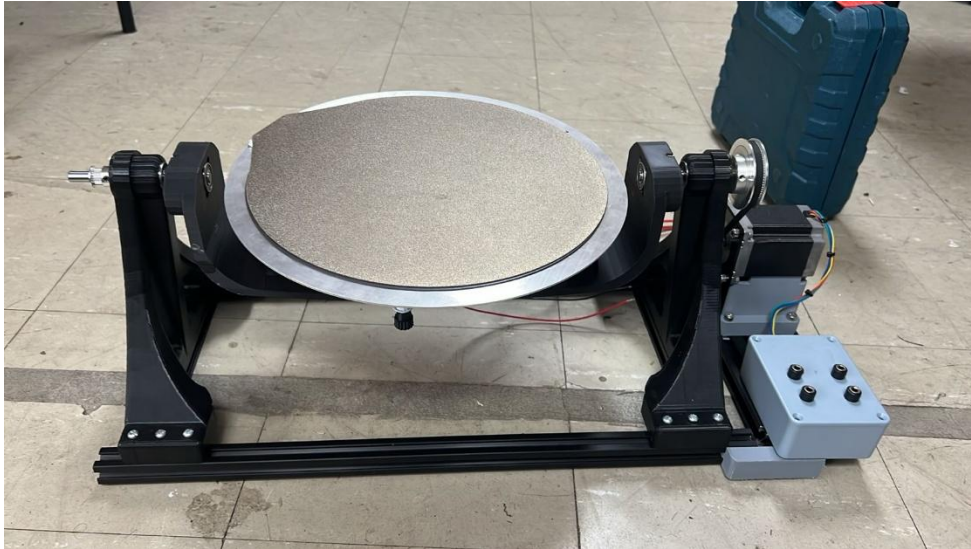
3.1.6 Ensamble e Integración de componentes mecánicos

Durante la fase de integración mecánica, se evaluaron las tolerancias dimensionales de los componentes fabricados. Debido a las tolerancias inherentes al proceso de impresión 3D, los alojamientos cilíndricos requirieron una etapa de posprocesamiento manual.

Se realizaron operaciones de escariado y lijado interno en los soportes laterales para adecuar el diámetro de los alojamientos. Esta corrección dimensional controlada permitió lograr un ajuste por interferencia al momento de instalar los rodamientos. La inserción a presión de estos elementos mecánicos eliminó cualquier holgura radial, asegurando que el anillo exterior del rodamiento quede totalmente inmovilizado sin necesidad de utilizar adhesivos químicos o prisioneros mecánicos, garantizando así la rigidez y alineación del eje de basculación.

Figura 3.16

Ensamble mecánico final.



Nota: Figura donde se muestra el ensamble mecánico finalizado.

Para garantizar la transmisión eficiente del par y eliminar el juego mecánico en las correas GT2, se implementaron mecanismos de ajuste posicional en los anclajes de los actuadores.

En el caso del eje B, el diseño de la pieza impresa incorporó ranuras correderas en la base de sujeción del motor NEMA 17. Esta característica geométrica permite el desplazamiento lineal del motor para tensar la banda manualmente antes de realizar el apriete final de la tornillería.

Para el Eje A, se aprovechó el modularidad de la estructura base. El soporte del motor NEMA 23 se instaló utilizando las guías T-slot de los perfiles de aluminio 2020, lo que permite deslizar el conjunto motor-soporte a lo largo del riel estructural. Este sistema facilita la modificación de la distancia entre centros de poleas hasta alcanzar la tensión operativa requerida.

3.2 Resultados de RobotStudio

Los resultados en RobotStudio se pueden ver desde la creación del robot posicionador como un eje externo. Para la integración del posicionador en el entorno de simulación, fue necesario realizar una migración de la geometría desde Autodesk Inventor.

Se realizó la exportación al formato neutro “Standard ACIS Text”, el cual es nativo para el motor geométrico de RobotStudio. Para garantizar la correcta asignación de movimientos, se

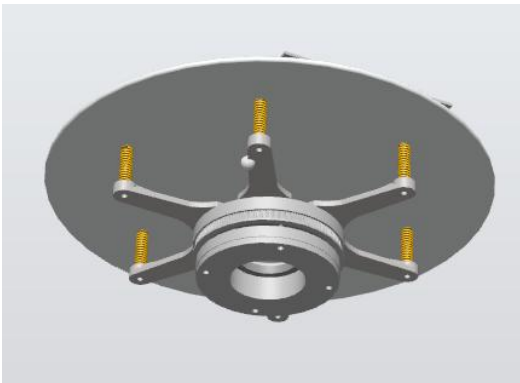
estableció la estrategia de agrupación de cuerpos que forman parte de la misma cadena cinemática. Esto se hace aislando y exportando los subconjuntos de piezas que comparten un mismo movimiento solidario, en lugar de importar pieza por pieza o el ensamblaje total.

3.2.1 Creación del eje externo en RobotStudio

Los eslabones usados fueron los siguientes: La estructura estática como base fija L1, el sistema basculante como eslabón L2, y la mesa giratoria como eslabón L3. La configuración es de doble junta rotacional, que permite el movimiento en los ejes A y B.

Figura 3.17

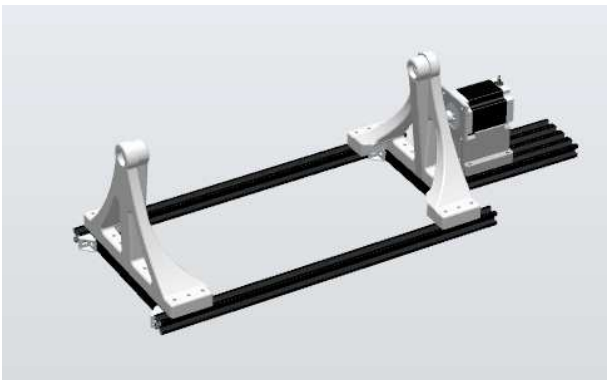
Subensamble rotacional.



Nota: *Eslabón del subensamble rotacional.*

Figura 3.18

Subensamble base fija.



Nota: *Eslabón de la base fija.*

Figura 3.19

Subensamble bascular.

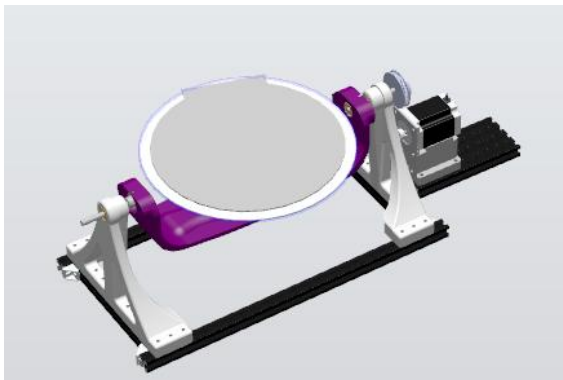


Nota: *Eslabón del subensamble bascular.*

Finalmente, se generó una representación digital en RobotStudio, que tiene los mismos movimientos y restricciones que tiene el ensamble de Inventor y el ensamble en la vida real.

Figura 3.20

Ensamble final en Robot Studio como eje externo.



Nota: Prototipo de mesa posicionadora dentro de RobotStudio.

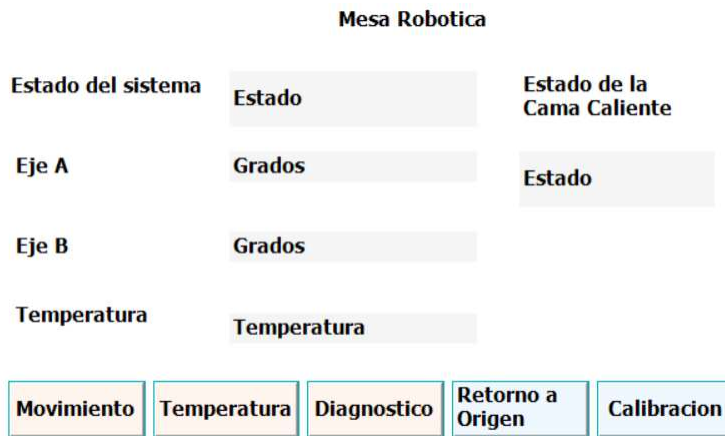
3.2.2 Creación de la interfaz de usuario dentro de RobotStudio

Para la operación y supervisión del posicionador, se desarrolló una Interfaz Hombre-Máquina integrada en el Flexpendant de ABB. El diseño de la interfaz se estructuró de tal manera que se tienen pantallas dedicadas para cada aspecto del robot posicionador.

En primer lugar, se implementó una pantalla principal que muestra toda la información del robot, permitiendo el monitoreo en tiempo real. de todas las variables de estado y la operatividad de la máquina.

Figura 3.21

Figura de la pantalla principal del Flexpendant.

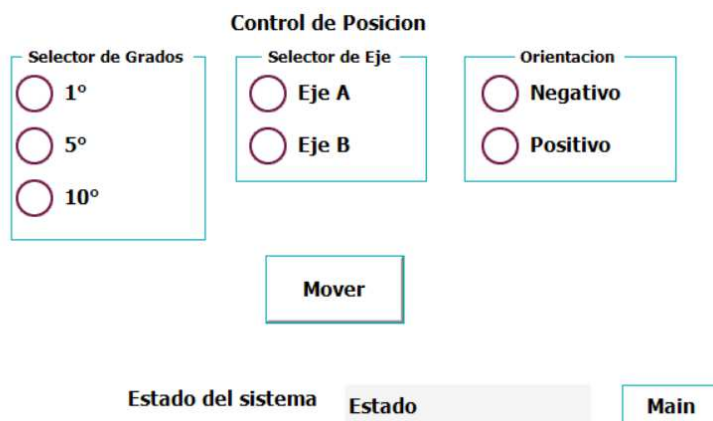


Nota: *Pantalla de inicio del ABB Flexpendant.*

Para el control de movimiento, se diseñó un módulo que permite el accionamiento manual de los ejes A y B. Este control incluye selectores de dirección (horario/antihorario) y botones de desplazamiento en pasos de 1°, 5° y 10°.

Figura 3.22

Figura de la pantalla "movimiento" del Flexpendant.



Nota: *Pantalla que permite movilizar ambos ejes en pasos de 1,5 y 10.*

También existe el módulo de control térmico, que permite monitorear la temperatura de la cama y modificar el punto deseado.

Figura 3.23

Figura de la pantalla “Temperatura” del Flexpendant.

Cama Termica

| | |
|---------------------------------|----------------|
| Temperatura Actual | Temperatura |
| SetPoint | Setpoint |
| Editar Setpoint 0° - 70° | |
| 0 | ▲ ▼ |
| | Fijar Setpoint |

Estado del sistema Estado Main

Nota: Pantalla que permite setear la temperatura de la superficie de impresión.

Por otra parte, el módulo de Diagnóstico visualiza los códigos transmitidos por el sistema embebido Arduino, facilitando la detección de fallos o mala sincronización.

Figura 3.24

Figura de la pantalla “Diagnostico” del Flexpendant.

Revision de errores

| | |
|----------------------|--------|
| Estado actual | Estado |
| Case Actual | Case |

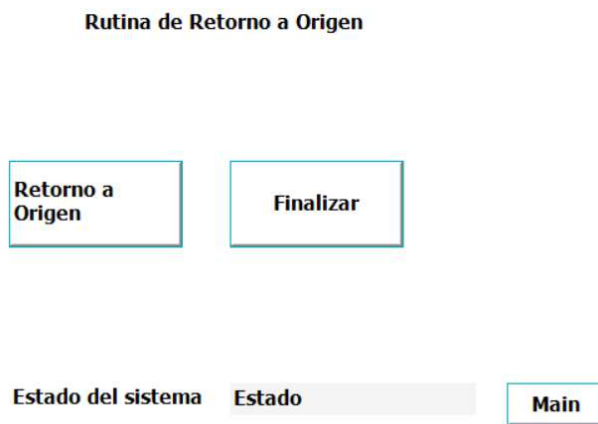
Main

Nota: Pantalla para revisar el envío de comandos.

Finalmente, se incorporaron rutinas de configuración y calibración, que incluyen la secuencia de Retorno a Origen y un asistente de Calibración, el cual permite ajustar la altura del robot hasta la posición óptima de impresión y confirmar el establecimiento del “cero” de pieza mediante un comando de finalización.

Figura 3.25

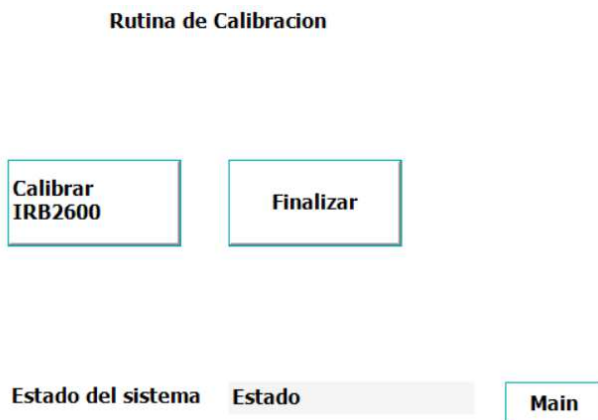
Figura de la pantalla “Retorno a Origen” del Flexpendant.



Nota: Pantalla para generar el retorno a Origen del robot.

Figura 3.26

Figura de la pantalla “Rutina de Calibración” del Flexpendant.



Nota: Pantalla para calibrar el brazo robótico IRB2600.

3.3 Resultados del diseño electrónico

Para el diseño electrónico, se obtuvieron los esquemáticos de conexiones, plano del tablero electrónico a usar en el sistema y se obtuvo también la tabla de partes en las cuales se encuentran los actuadores y sensores usados en el robot posicionador. La selección de componentes, definida en la metodología, fundamenta toda la infraestructura electrónica necesaria para garantizar la operación del posicionador. A continuación, se detalla la arquitectura de las conexiones en esquemático y en físico.

3.3.1 Esquemático de conexiones

La gestión de señales del sistema se centralizó en el microcontrolador Arduino Mega 2560. Se implementó una asignación estratégica de pines para separar las señales de alta frecuencia (PWM y pulsos de motores) de las entradas analógicas sensibles, minimizando el ruido electromagnético.

Tabla 3.6

Tabla de pines digitales y analógicos usados en el Arduino Mega

| Tipo de Pin | Pin asignado | Función |
|---------------|--------------|---------------------------------|
| Pin Analógico | A15 | Capturar la señal del termistor |
| Pin Digital | D22 | Señal de Pasos - Motor 1 |
| Pin Digital | D23 | Señal de Dirección - Motor 1 |
| Pin Digital | D24 | Señal de Habilidad - Motor 1 |
| Pin Digital | D26 | Señal de Pasos - Motor 2 |
| Pin Digital | D27 | Señal de Dirección - Motor 2 |
| Pin Digital | D28 | Señal de Habilidad - Motor 2 |
| Pin Digital | D32 | Entrada de Opto interruptor |
| Pin Digital | D35 | Entrada de Botón |
| Pin Digital | D44 | Salida de PWM para el MOSFET |

Nota: Lista de los pines utilizados físicamente en Arduino.

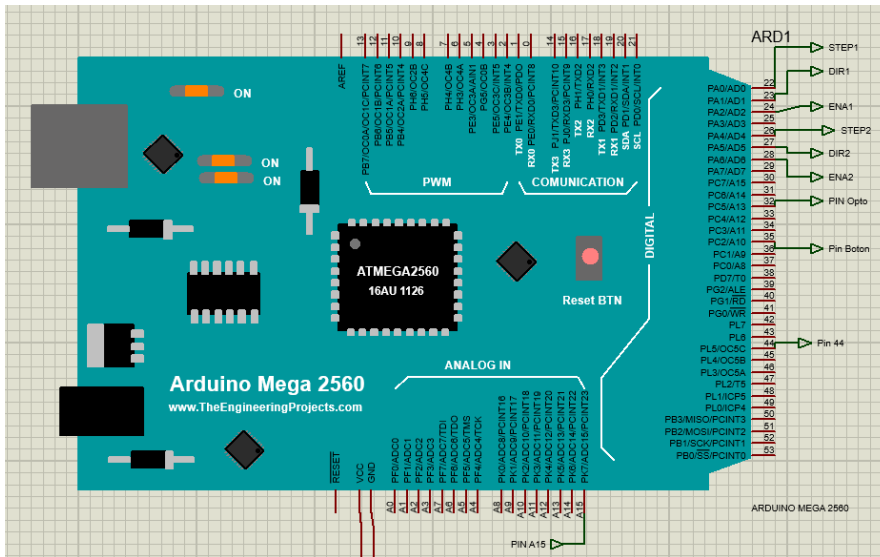
La validación del circuito se documenta a través de los diagramas esquemáticos finales, los cuales aseguran la reproducibilidad del sistema:

- Lógica de Control (Figuras 3.27 y 3.30): Se detalla la interfaz entre el Arduino y los periféricos de 5V.
- Etapa de Potencia (Figuras 3.28 y 3.29): Se ilustra la distribución de la alimentación de 24V hacia los drivers TB6600 y la cama caliente, incluyendo las protecciones y el control de conmutación.
- Interfaz de Comunicación (Figura 3.31): La integración del Ethernet Shield W5100 se realizó mediante apilamiento directo sobre el Arduino Mega, utilizando el bus

SPI (pines ICSP) para la transmisión de datos, lo que permite conservar la disponibilidad de los pines de E/S digitales laterales.

Figura 3.27

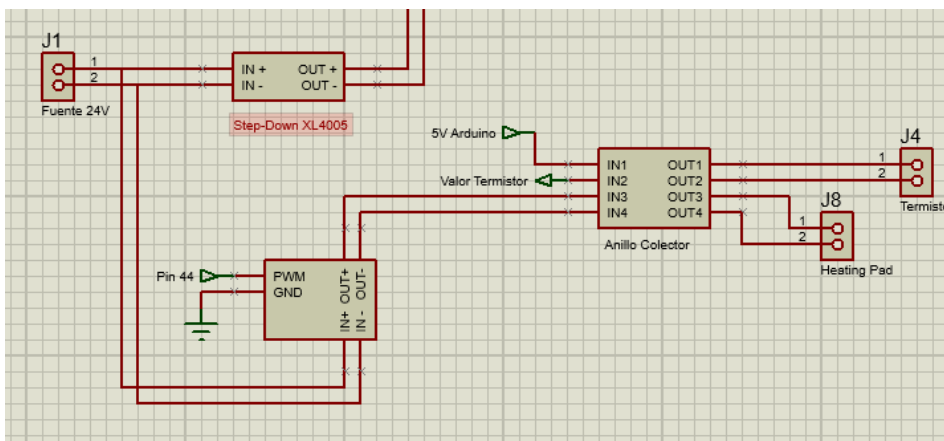
Conexiones entre Arduino y pines de señales.



Nota: Esquemático de conexiones en el Arduino Mega.

Figura 3.28

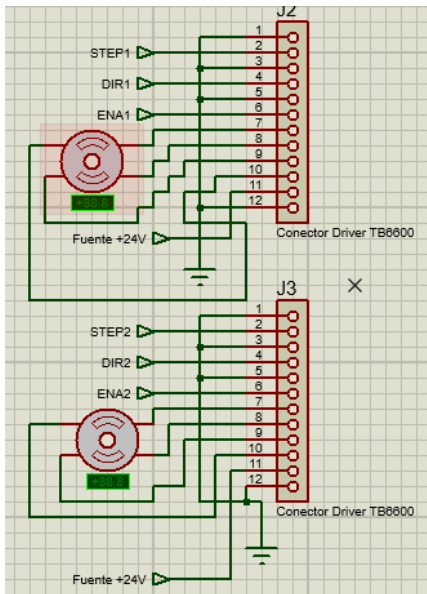
Conexiones de potencia 24V.



Nota: Esquemático de conexiones desde la fuente de 24V hacia el MOSFET y hacia el Step Down.

Figura 3.29

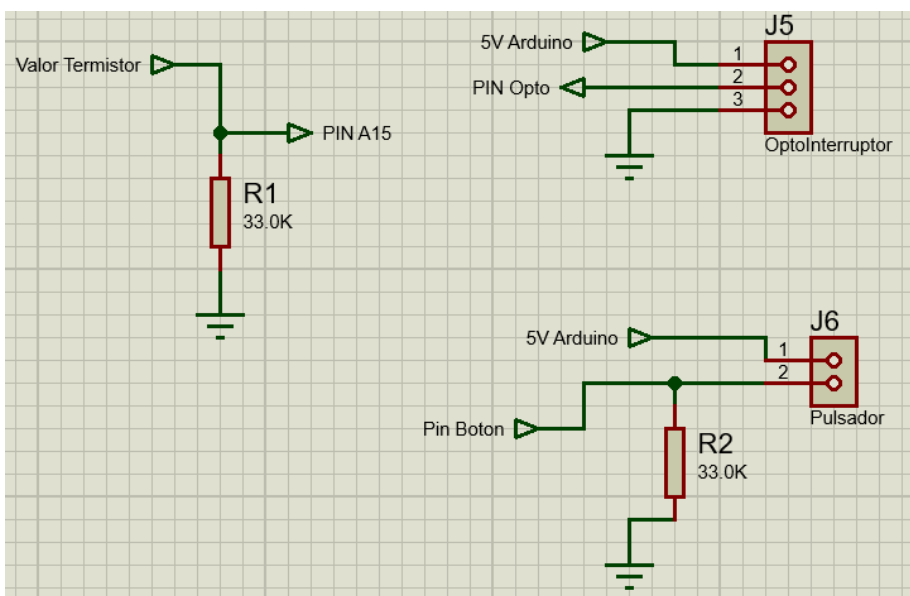
Esquema de conexiones de los controladores TB6600.



Nota: Esquemático de conexiones de los pines digitales hacia los controladores de motores a paso.

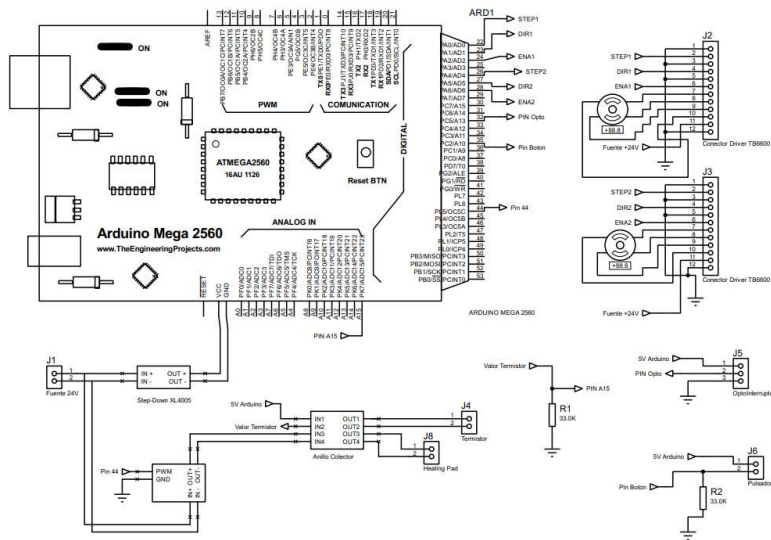
Figura 3.30

Conexiones de señales 5V



Nota: Esquemático de conexiones desde el Arduino hacia los componentes como botón, opto interruptor y divisor de voltaje.

Figura 3.31
Esquemático final



Nota: *Esquemático completo de conexiones.*

Figura 3.32
Apilamiento de la Shield Ethernet



Nota: *Se puede ver como todos los pines siguen siendo utilizables.*

3.3.2 Montaje de conexiones físico

El montaje físico de las conexiones se realizó mediante el uso de una caja de paso eléctrica, para optimizar el cableado y conexiones que se requieren en el robot posicionador.

Figura 3.33

Cableado final del prototipo



Nota: *Se visualiza el prototipo final con su respectivo cableado.*

A la vez se utilizaron prensaestopas para poder limitar el movimiento de los cables, entre la caja de paso donde se encuentran los componentes principales y los componentes secundarios como sensores que van hacia el microcontrolador. La caja además se conecta simplemente por el puerto ethernet RJ45 y se alimenta con una toma de corriente de 110v.

3.4 Resultados del diseño de control

Una vez validada la infraestructura electrónica, se procedió a la implementación y ajuste de los algoritmos de control. Esta etapa se enfocó en la respuesta dinámica del sistema térmico, un subsistema crítico para garantizar la calidad de la manufactura aditiva.

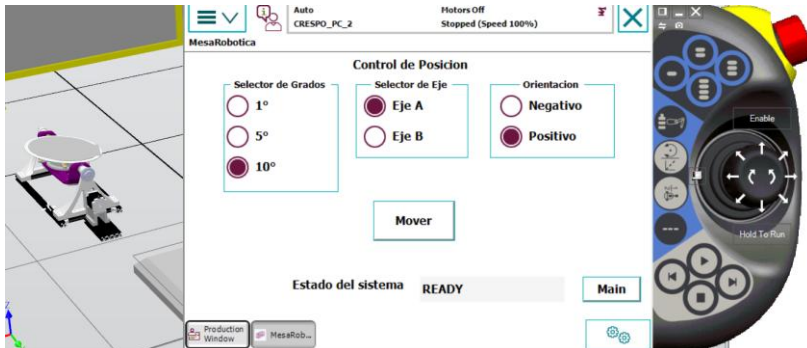
3.4.1 Respuestas del control PID de temperatura

La gráfica de respuesta ante un valor de referencia evidencia un comportamiento sobre amortiguado, caracterizado por un ascenso progresivo sin presentar sobre impulsos que excedan el valor de referencia de 50°C.

Una vez alcanzado el régimen permanente, el sistema mantiene la temperatura objetivo con una oscilación centrada en el setpoint. Se observa la presencia de ruido de alta frecuencia en la señal del sensor, atribuible a la sensibilidad del termistor y al entorno electromagnético del prototipo. No obstante, la acción del término Integral compensa eficazmente estas perturbaciones, manteniendo el error en estado estacionario dentro del rango de tolerancia de ± 2 grados lo cual es aceptable para asegurar la adherencia del material termoplástico.

Figura 3.35

Figura que muestra el envío del comando desde el Flexpendant.



Nota: Se utiliza el Flexpendant virtual para el envío de señales.

Figura 3.36

Figura que donde se visualiza el movimiento de la mesa.



Nota: Mesa con +10 grados en el eje A.

Esto permite cumplir con el objetivo y requerimientos del cliente, de poder tener una herramienta HMI para poder mover la mesa robótica, y no solo controlarla con código enviado desde RAPID.

3.6 Análisis de costos

El desarrollo del prototipo se rigió bajo un criterio de optimización de recursos, alineándose con el requerimiento de maximizar la utilización del inventario disponible en el Laboratorio de

Robótica y Control Industrial. Esta estrategia permitió reducir parte de la inversión inicial, aprovechando componentes de alto valor como la fuente de poder y los motores NEMA 23 y 17.

No obstante, para alcanzar los objetivos de conectividad TCP/IP y control térmico preciso que diferencian a este posicionador de una mesa rotativa convencional, fue indispensable la adquisición de componentes electrónicos específicos y materiales de manufactura no disponibles en el inventario institucional. Por ende, se enlista la lista de materiales adquiridos para la construcción del prototipo final.

| Descripción | Unidades | Precio Unitario | Precio Final |
|-------------------------------------|----------|-----------------|--------------|
| Controladora de motor a paso TB6600 | 2 | \$12.89 | \$25.78 |
| Poleas sincronas GT2 para eje 8mm | 1 | \$19.99 | \$19.99 |
| MOSFET | 1 | \$6.99 | \$6.99 |
| Tornillos M3 | 1 | \$6.99 | \$6.99 |
| Lazy Susan | 1 | \$12.99 | \$12.99 |
| Bandas Sincronas GT2 | 1 | \$7.99 | \$7.99 |
| Pad calentador con termistor | 1 | \$16.99 | \$16.99 |
| Acoples Rigidos Ejes | 1 | \$13.99 | \$13.99 |
| Mesa Magnetica | 1 | \$24.99 | \$24.99 |
| Anillo Colector | 1 | \$41.47 | \$41.47 |
| M3 Insertos para impresión 3D | 1 | \$9.98 | \$9.98 |
| Conectores de extrusión de aluminio | 1 | \$9.99 | \$9.99 |
| Tuercas de nivelación | 2 | \$8.89 | \$17.78 |
| Extrusiones de aluminio | 1 | \$10.43 | \$10.43 |
| Eje de 8mm | 1 | \$5.13 | \$5.13 |
| Plancha de Aluminio | 1 | \$20.00 | \$20.00 |

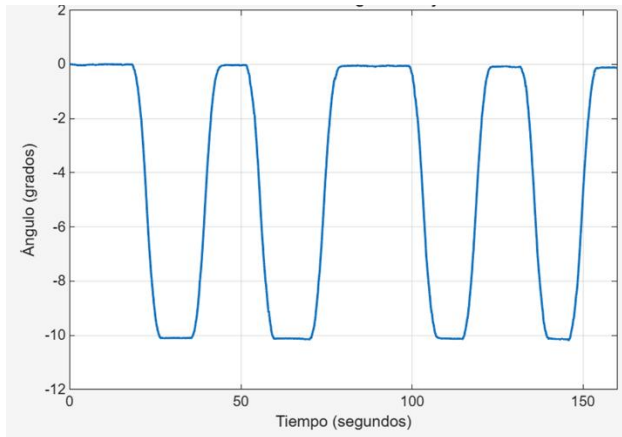
| | | | |
|---|---|---------|---------|
| | | | |
| Corte laser de Aluminio | 1 | \$10.00 | \$10.00 |
| Rulimanes | 6 | \$0.69 | \$4.14 |
| Pies de amigo | 6 | \$0.96 | \$5.80 |
| Filamento PLA Panchroma Black Mate | 1 | \$21.00 | \$21.00 |
| Filamento PLA Panchroma Gris Fosil | 1 | \$21.00 | \$21.00 |
| Filamento PETG PolyMaker Blanco | 1 | \$23.00 | \$23.00 |
| Espadines a Bornera | 1 | \$0.60 | \$0.60 |
| Juego de espadines | 1 | \$0.60 | \$0.60 |
| Cable Cat 18 metro | 5 | \$0.75 | \$3.75 |
| Caja de termoretraibles | 1 | \$10.60 | \$10.60 |
| Elementos de Fijación M5 | 1 | \$5.50 | \$5.50 |
| Conectores universales presión 2 pin | 5 | \$0.61 | \$3.05 |
| Conectores universales presión 5 pin | 5 | \$0.87 | \$4.35 |
| Bornera 3 Pin Presión | 6 | \$0.7 | \$4.2 |
| StepDown XL4005 | 1 | \$3.50 | \$3.50 |
| Lámina de Corcho | 1 | \$3.00 | \$3.00 |
| Cinta Aislante térmica | 1 | \$5.60 | \$5.60 |
| Opto interruptores | 1 | \$2.25 | \$2.25 |
| Terminales Banana | 4 | \$0.60 | \$2.40 |
| Baquelita | 1 | \$0.50 | \$0.50 |

| | | | |
|------------------------|---|---------|---------|
| Resistencia 27k | 1 | \$0.20 | \$0.20 |
| Fusibles 1 A | 1 | \$0.50 | \$0.50 |
| Porta Fusible | 1 | \$1.00 | \$1.00 |
| Caja de Paso Eléctrica | 1 | \$40.00 | \$40.00 |
| Borneras 3 Pin | 5 | \$0.50 | \$2.50 |
| Prensaestopas ISO 20 | 3 | \$2.70 | \$8.10 |

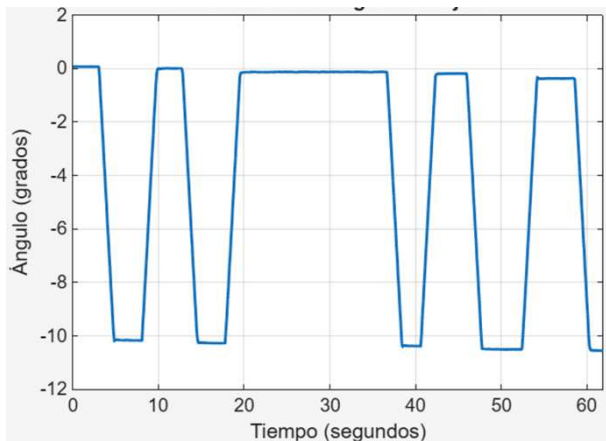
El costo final de los materiales para el prototipo asciende \$430.52. A este valor se deben adicionar los costos logísticos de la importación de componentes desde Estados Unidos y Quito, así como lo cual representa un valor de \$45.00. Finalmente, al agregar el valor de la mano de obra por cada estudiante de \$100.00, que representa el tiempo dedicado al ensamblaje mecánico, integración electrónica y programación. En total la inversión del posicionador robótico asciende a \$675.52.

3.7 Resultados de precisión del prototipo.

Con el fin de evaluar la precisión en el posicionamiento del prototipo, se contrastaron los valores angulares registrados por la placa Arduino frente a mediciones de referencia obtenidas mediante instrumentación externa. La validación experimental se realizó empleando MATLAB Mobile para la captura de los ángulos de Euler, permitiendo cuantificar el desplazamiento angular de la mesa robótica. Este procedimiento facilitó la ejecución de pruebas orientadas a verificar la funcionalidad, repetibilidad y exactitud del sistema.

Figura 3.37*Prueba experimental 10 grados Eje A*

Nota: Se visualiza la repetibilidad del experimento para el Eje A.

Figura 3.38*Prueba experimental 10 grados Eje B*

Nota: Se visualiza la repetibilidad del experimento para el Eje B.

Durante las pruebas de movimiento incremental, se observó el comportamiento del actuador en rangos de 0° a 10° . Los resultados obtenidos se detallan a continuación:

- Prueba de resolución mínima (0° a 1°): Al comandar un movimiento de 1 grado, el sensor registró valores oscilantes entre 0.9° y 1.0° .
- Prueba de rango medio (0° a 5° y 0° a 10°): Al realizar movimientos hacia 5° y 10° , se mantuvieron lecturas con una desviación máxima de -0.1° .

- Prueba de repetibilidad: En todos los casos, en el regreso a la posición 0° , el sistema marcó consistentemente 0.0° , lo que indica repetibilidad y ausencia de errores en el retorno.

3.8 Limitaciones del prototipo

La validación del prototipo presenta restricciones derivadas de la instrumentación disponible durante la fase experimental. Específicamente, la caracterización cuantitativa de precisión y repetibilidad se centró en el eje de basculación, utilizando mediciones de inclinación digitalmente.

Debido a que estos sensores operan basándose en la gravedad, no fue factible aplicar la misma metodología para cuantificar el error numérico en el eje de rotación, por lo que su validación se limitó a un nivel funcional y visual.

Asimismo, los resultados obtenidos están condicionados por la resolución del sensor de ± 0.1 , lo cual implica que cualquier desviación de posicionamiento inferior a este umbral cae dentro del margen de incertidumbre instrumental, impidiendo la detección de errores más finos en esta etapa del estudio.

Desde la perspectiva del sistema de control, el prototipo opera bajo un esquema de lazo abierto, característico de los motores paso a paso utilizados. A diferencia de los manipuladores industriales que integran servomotores con encoders absolutos para la retroalimentación constante de posición, este diseño asume la ejecución de los pasos sin una verificación en tiempo real.

Esta configuración limita la capacidad del sistema para detectar o corregir automáticamente posibles pérdidas de pasos en el caso de que perturbaciones externas o cargas inerciales superen el torque de retención de los actuadores.

Finalmente, existen limitaciones inherentes al proceso de manufactura aditiva empleado en la construcción de los componentes estructurales. Al estar fabricado parcialmente mediante impresión 3D, la rigidez del conjunto es inferior a la de una mesa de posicionamiento industrial mecanizada en acero o aluminio.

Esta característica restringe la capacidad de carga máxima del dispositivo y podría introducir pequeñas flexiones elásticas o vibraciones bajo condiciones dinámicas exigentes, factores que deben considerarse al evaluar el desempeño del prototipo en operaciones de alta velocidad.

Capítulo 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se sintetizan los hallazgos obtenidos tras el desarrollo e implementación del posicionador robótico de dos grados de libertad. A continuación, se exponen las conclusiones y las recomendaciones sugeridas para futuras líneas de trabajo, sobre la implementación de un eje externo en conjunto con el robot IRB2600 del Laboratorio de Manufactura y Control Industrial.

4.1 Conclusiones

Luego el proceso de diseño y validación, se obtienen las siguientes conclusiones:

- El diseño mecánico se validó satisfactoriamente mediante la aplicación de análisis de elementos finitos y simulación dinámica. Se confirmó que los componentes estructurales fabricados en PLA y PETG operan dentro de los márgenes de seguridad establecidos, garantizando la integridad del sistema bajo cargas críticas. Adicionalmente, el dimensionamiento de la transmisión de potencia aseguró un factor de seguridad superior a 4, lo que valida la selección de los motores y correas para transmitir el torque requerido sin presentar fallos mecánicos o pérdida de precisión.
- La integración del prototipo en el entorno RobotStudio se completó exitosamente al configurar el mecanismo como un eje externo funcional vinculado al controlador virtual. Esta implementación permitió la generación de una representación digital que replica la cadena cinemática del dispositivo físico, facilitando la validación de trayectorias y la detección preventiva de colisiones. De esta manera, se aseguró la operatividad de las secuencias de movimiento en un entorno seguro antes de su ejecución en la celda robótica real.
- Se logró la integración efectiva entre el controlador industrial IRC5 y el sistema embebido basado en Arduino mediante la implementación del protocolo estándar TCP/IP. Esta arquitectura de comunicación permitió romper la dependencia de hardware propietario, gestionando el accionamiento de los motores y el control térmico directamente desde la interfaz del robot. Con ello, se validó la capacidad de expandir los grados de libertad de la celda robótica utilizando componentes de arquitectura abierta, garantizando un intercambio de datos estable y sincronizado.

- Finalmente, se validó la funcionalidad operativa del prototipo físico mediante pruebas que confirmaron una precisión de posicionamiento adecuada en el eje de basculación y una estabilidad térmica de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en el control PID, cumpliendo con los requerimientos para el proceso FDM. El análisis de costos demostró que la implementación del dispositivo es económicamente viable, logrando una solución funcional con una inversión significativamente inferior a la de los posicionadores comerciales, lo que facilita el acceso a tecnologías de manufactura multi axial dentro del laboratorio.

4.2 Recomendaciones

A partir de la experiencia adquirida durante el desarrollo del prototipo y considerando las limitaciones técnicas descritas en el análisis de resultados, se proponen las siguientes recomendaciones. Estas sugerencias tienen como objetivo optimizar las prestaciones del sistema, incrementar su robustez mecánica y elevar su nivel de integración hacia estándares industriales para futuras líneas de investigación.

- Se recomienda sustituir, los actuadores actuales por motores paso a paso con encoders rotativos integrados o servomotores. Esta mejora permitiría al sistema operar en lazo cerrado, dotando al controlador de la capacidad para detectar y corregir automáticamente cualquier pérdida de pasos causada por perturbaciones externas o cargas dinámicas imprevistas, garantizando así la integridad posicional en procesos de manufactura de larga duración.
- Para entornos de operación continua o aplicaciones que requieran temperaturas de cama superiores a 60°C , se sugiere la manufactura de los componentes críticos (como la hamaca central y los soportes de motor) en aluminio 6061 mediante mecanizado CNC. Esta migración de material aumentaría significativamente la rigidez estructural del conjunto y mejoraría la disipación térmica de los actuadores, superando las limitaciones inherentes al PLA utilizado en el prototipo actual.
- Con el fin de automatizar el flujo de trabajo de impresión 3D multi-eje, se recomienda el desarrollo de un algoritmo que actúe como interfaz entre el software de laminado y el controlador del robot. Esta herramienta debería ser capaz de

traducir las trayectorias de G-Code generadas por software especializado en comandos RAPID y tramas TCP/IP interpretables por el sistema, eliminando la necesidad de programación manual de trayectorias.

- Se aconseja realizar una validación metrológica exhaustiva del eje de rotación utilizando instrumentación externa no dependiente de la gravedad, como interferometría láser o encoders absolutos de alta resolución. Los datos obtenidos de este análisis permitirían generar una tabla de compensación de errores en el software de control, mejorando la precisión final de las piezas fabricadas al corregir las desviaciones micrométricas propias de la transmisión mecánica.

Referencias

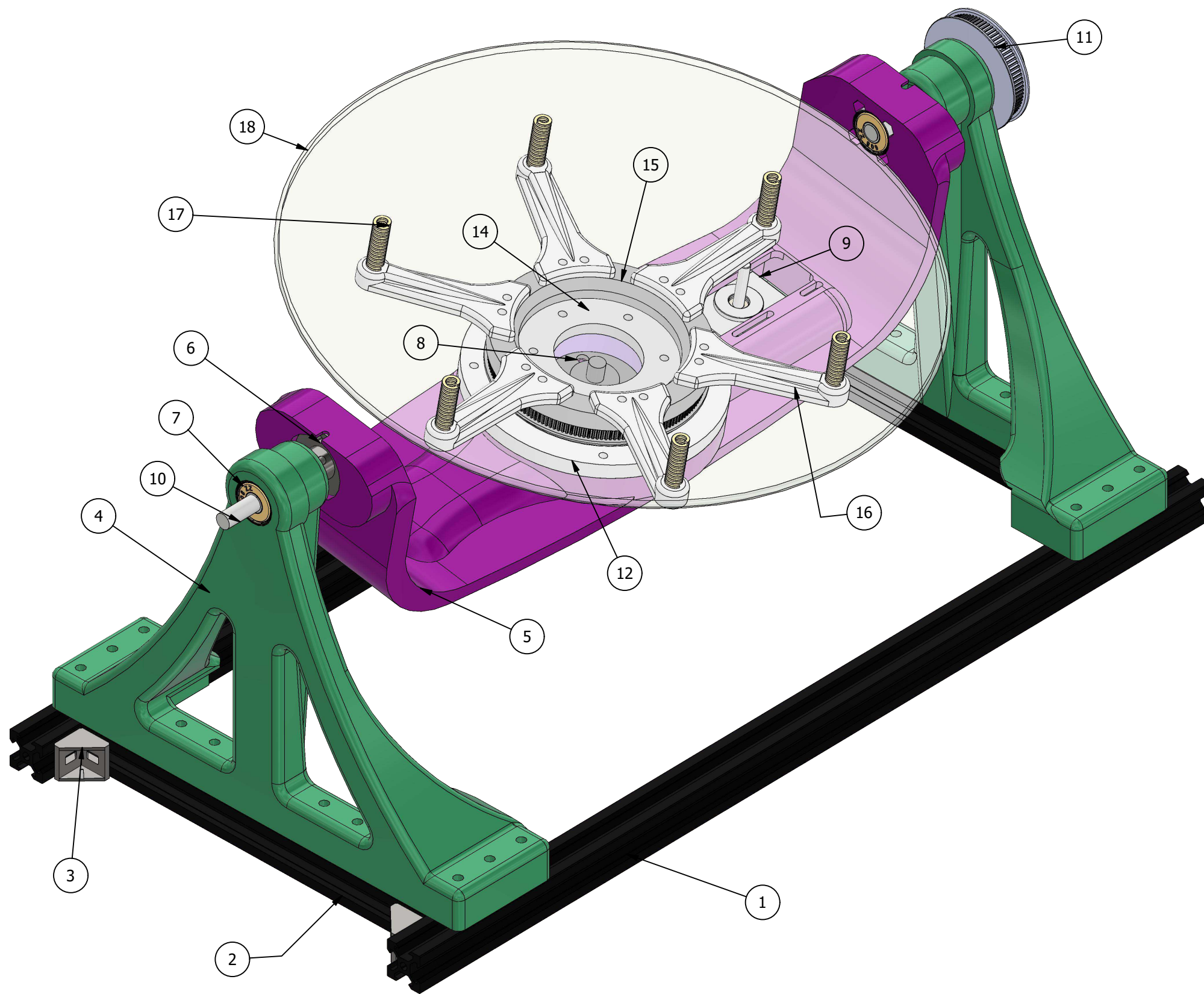
- [1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen y D. Hui, «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications, and challenges,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [2] P. Tang, X. Zhao, H. Shi, B. Hu, J. Ding, B. Yang y W. Xu, «A review of multi-axis additive manufacturing: Potential, opportunity and challenge,» *Additive Manufacturing*, vol. 83, p. Article 104075, 2024.
- [3] C. Wu, C. Dai, G. Fang, Y. J. Liu y C. C. L. Wang, «RoboFDM: A robotic system for support-free fabrication using FDM,» de *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Singapore, 2017.
- [4] M. Leary, L. Merli, F. Torti, M. Mazur y M. Brandt, «Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures,» *Materials & Design*, vol. 63, p. 678–690, 2014.
- [5] M. Wüthrich, A. Forster, A. Eggenberger y M. Bächer, «A Novel Slicing Strategy to Print Overhangs without Support Material,» *Applied Sciences*, vol. 11, p. 8760, 2021.
- [6] W. Bolton, *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, Harlow: Pearson, 2019.
- [7] A. S. Tanenbaum, N. Feamster y D. J. Wetherall, *Computer Networks*, Harlow: Pearson, 2021.
- [8] Y. Koren, X. Gu y W. Guo, «Open-architecture products,» *CIRP Annals*, vol. 62, n° 2, p. 719–729, 2013.
- [9] J. Jiang, X. Xu y J. Stringer, «Support Structures for Additive Manufacturing: A Review,» *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 2, n° 4, p. 64, 2018.

- [10] Impresoras3D.com, «El uso de soportes en la impresión 3D,» Impresoras3D.com, 15 June 2023. [En línea]. Available: <https://www.impresoras3d.com/el-uso-de-soportes-en-la-impresion-3d/>. [Último acceso: 6 November 2025].
- [11] E. Utley, «An Introduction to Designing for Metal 3D Printing,» SOLIDWORKS Blog, June 2017. [En línea]. Available: <https://my.solidworks.com/reader/wpessblogs/2017%252F06%252Fintroduction-designing-metal-3d-printing.html/an-introduction-to-designing-for-metal-3d-printing?&lang=it>. [Último acceso: 6 November 2025].
- [12] Y. Li, K. Tang, D. He y X. Wang, «Multi-axis support-free printing of freeform parts with lattice infill structures,» *Computer-Aided Design*, vol. 133, p. Article 103135, 2021.
- [13] E. Tapia, L. Sastoque-Pinilla, U. Lopez-Novoa, I. Bediaga y N. L. d. Lacalle, «Assessing Industrial Communication Protocols to Bridge the Gap between Machine Tools and Software Monitoring,» *Sensors*, vol. 23, nº 12, p. 5694, 2023.
- [14] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani y G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*, London: Springer, 2009.
- [15] M. W. Spong, S. Hutchinson y M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, Hoboken: Wiley, 2020.
- [16] P. Corke, *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB®*, Cham: Springer, 2017.
- [17] F. Marić, L. Petrović, M. Guberina, J. Kelly y I. Petrović, «A Riemannian Metric for Geometry-Aware Singularity Avoidance by Articulated Robots,» *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 145, nº 10.1016/j.robot.2021.103865, p. 103865, 2021.
- [18] H. Wang, Z. Zhou, X. Zhong y Q. Chen, «Singular Configuration Analysis and Singularity Avoidance with Application in an Intelligent Robotic Manipulator,» *Sensors*, vol. 22, nº 3, p. 1239, 2022.
- [19] Ricoh 3D, «Fused Deposition Modelling,» Ricoh 3D, 2019. [En línea]. Available: https://3d.ricoh.com/wp-content/uploads/2019/10/Ricoh_FDM_Diagram-1.jpg. [Último acceso: 6 November 2025].

- [20] A. Dey y N. Yodo, «A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics,» *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 3, nº 3, p. 64, 2019.
- [21] O. A. Mohamed, S. H. Masood y J. L. Bhowmik, «Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects,» *Advances in Manufacturing*, vol. 3, nº 1, pp. 42-53, 2015.
- [22] Raise3D, «Support Structure (infografía),» 2020. [En línea]. Available: https://s1.raise3d.com/2020/12/Raise3D-Academy_Info-Pic_Support-Structure-2-900x300.jpg. [Último acceso: 5 November 2025].
- [23] R. K. Mueller, «3D Printing: Multi-Axis Printing & Overhangs,» XYZdims.com, 14 March 2021. [En línea]. Available: <https://xyzdims.com/2021/03/14/3d-printing-multi-axis-printing-overhangs/>. [Último acceso: 6 November 2025].
- [24] V. B. Bhandari, *Design of Machine Elements*, New Delhi: McGraw-Hill, 2021.
- [25] A. Hughes y B. Drury, *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*, Oxford: Newnes, 2019.
- [26] L. Fiorineschi, F. S. Frillici, L. Pugi y F. Rotini, «Impact of Cycloid's and Roller's Dimensional Errors on the Performance of a Cycloidal Drive for Power Transmission,» *Machines*, vol. 11, nº 8, p. 772, 2023.
- [27] Stagnoli Gears, «Reductor cicloide,» Stagnoli Gears, 12 February 2024. [En línea]. Available: <https://www.stagnoligears.com/en/plastic-gears-news/cycloidal-drives/>. [Último acceso: 6 November 2025].
- [28] Direct Industry, «Posicionador eléctrico IRPB A series,» Direct Industry, [En línea]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/abb-robotics/product-30265-1700122.html>. [Último acceso: 6 November 2025].
- [29] J.-P. Merlet, *Parallel Robots*, Dordrecht: Springer, 2006.
- [30] C. Dai, C. C. L. Wang, C. Wu, S. Lefebvre, G. Fang y Y.-J. Liu, «Support-free volume printing by multi-axis motion,» *ACM Transactions on Graphics*, vol. 37, nº 4, p. 1133, 2018.

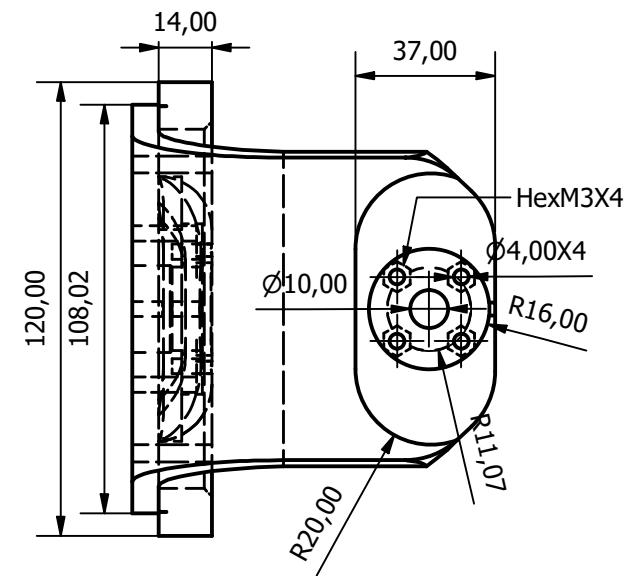
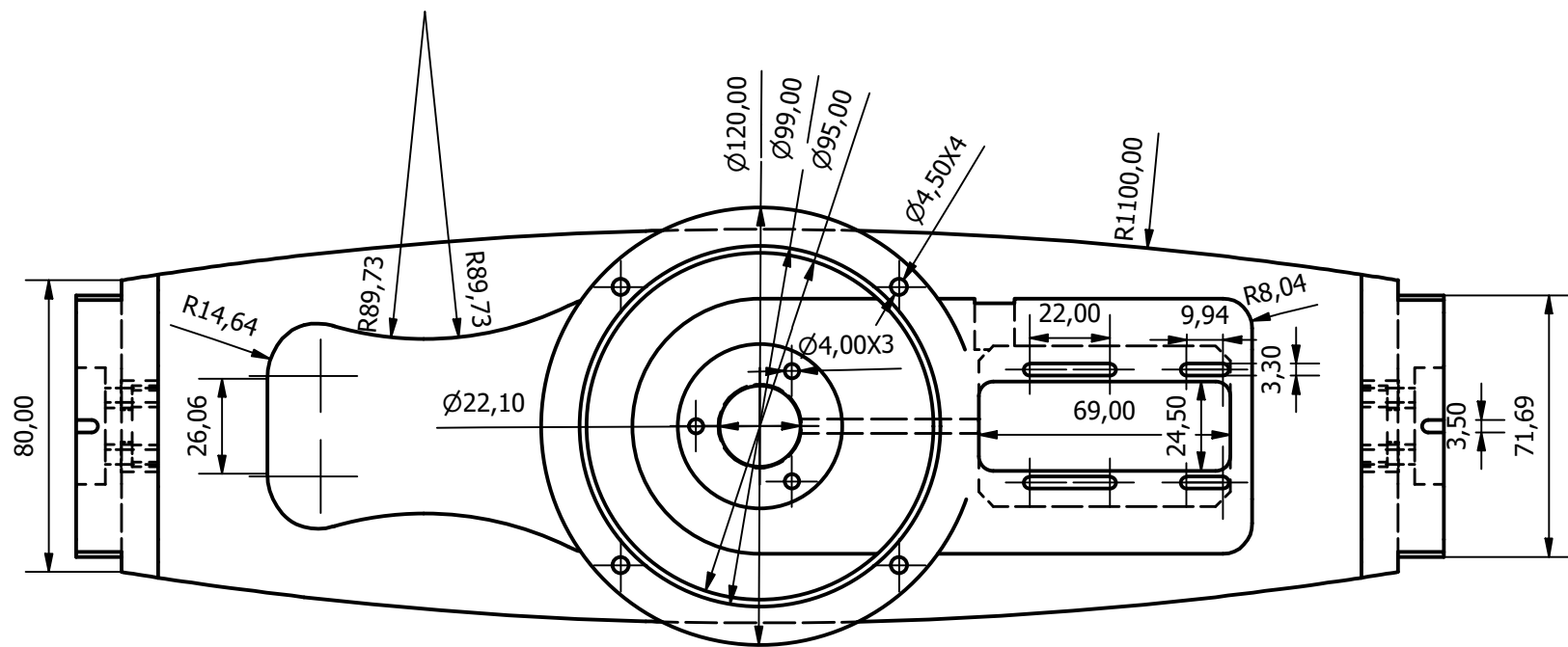
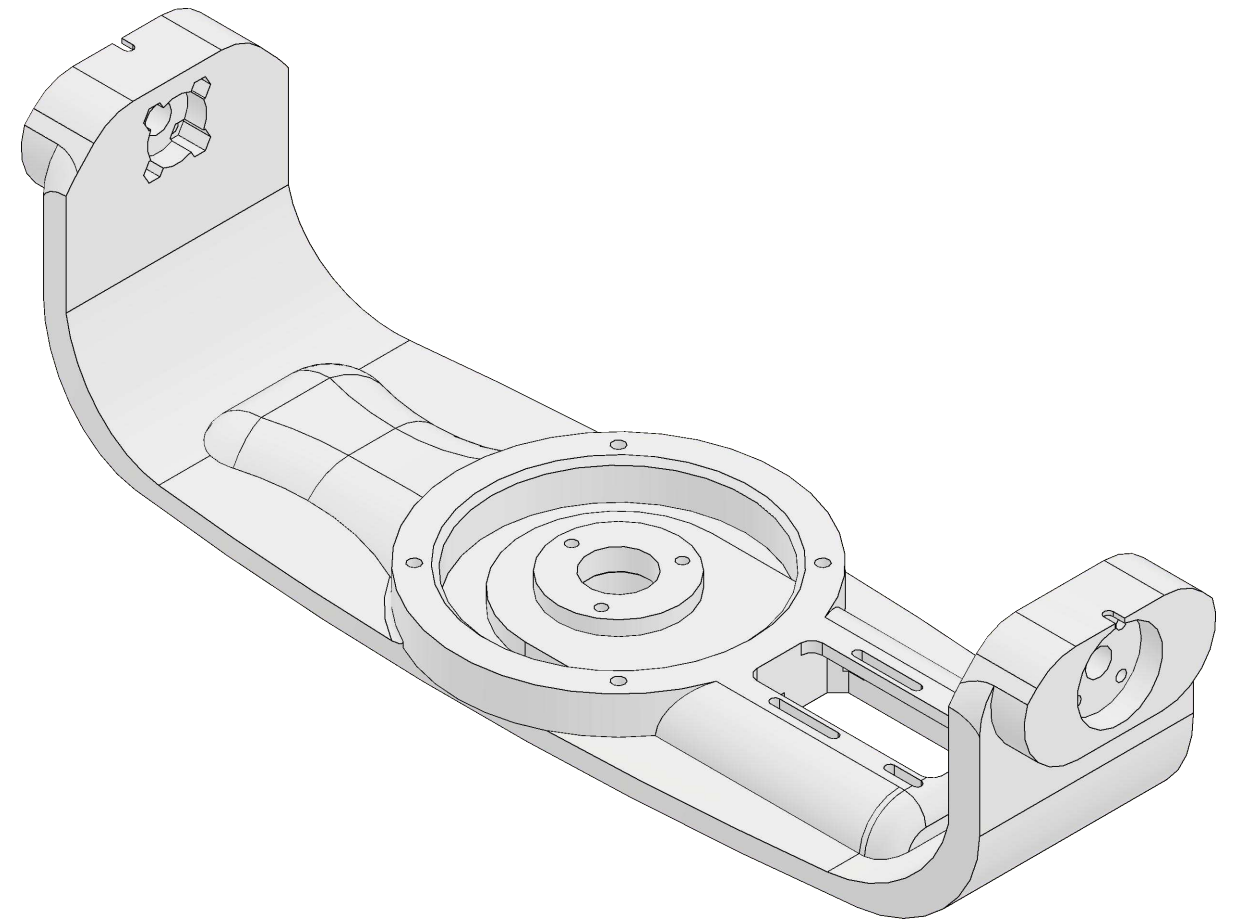
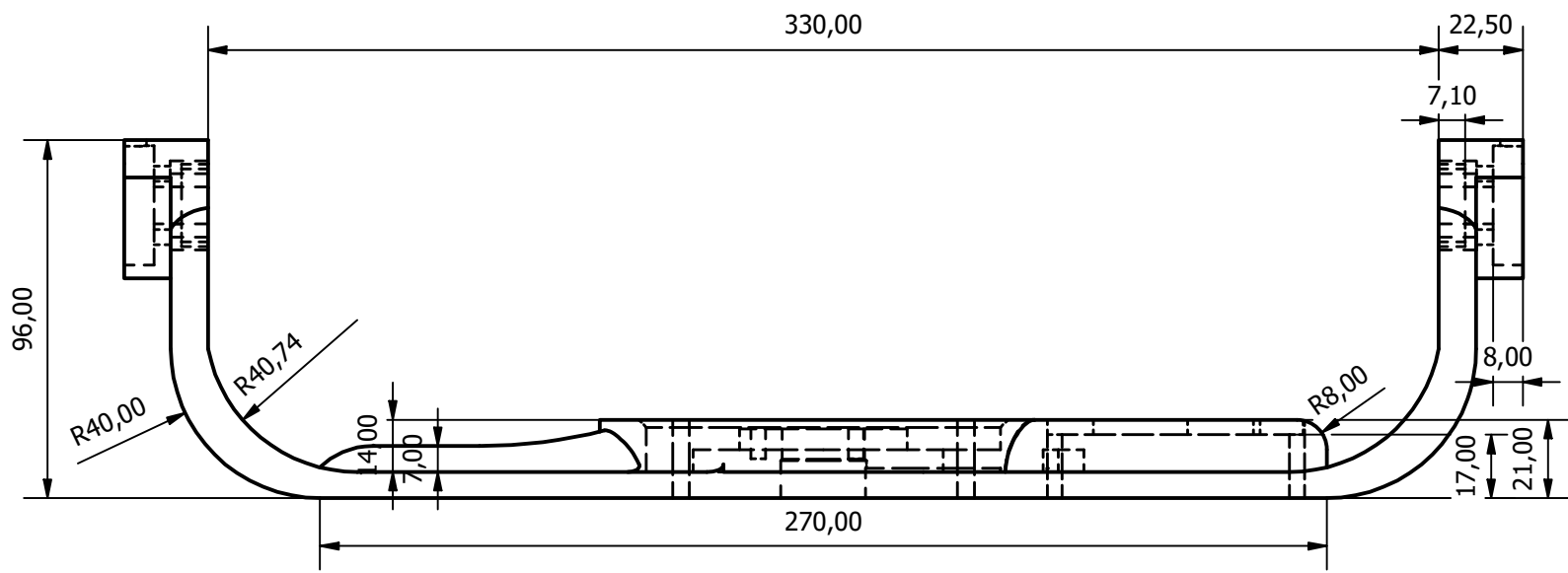
- [31] D. Chaparro, R. Zavala-Yoe y R. A. Ramirez-Mendoza, «Análisis, Diseño y Control de un Manipulador Paralelo 3-SPS-1S Utilizado en Aplicaciones de Seguridad,» 2015.
- [32] Buzzloopster, «Voron-Trident-5-axis,» 2024. [En línea]. Available: <https://github.com/Buzzloopster/Voron-Trident-5-axis>.
- [33] Gates Corporation, PowerGrip® GT®3 Drive Design Manual, Denver: Gates Corporation, 2020.

Apéndices

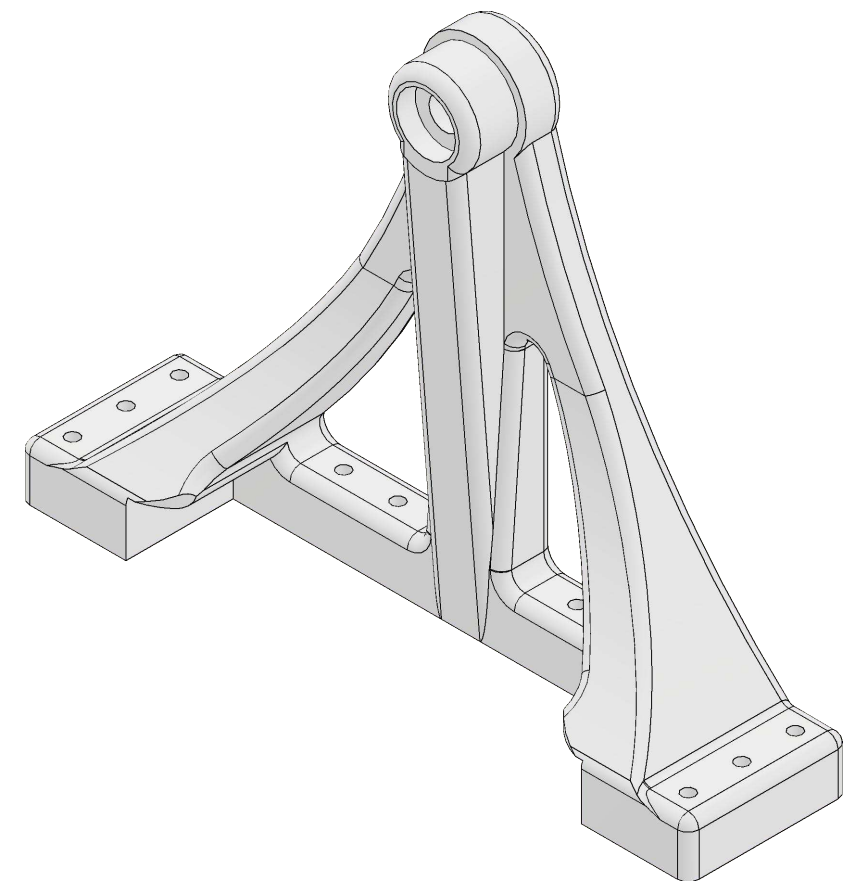
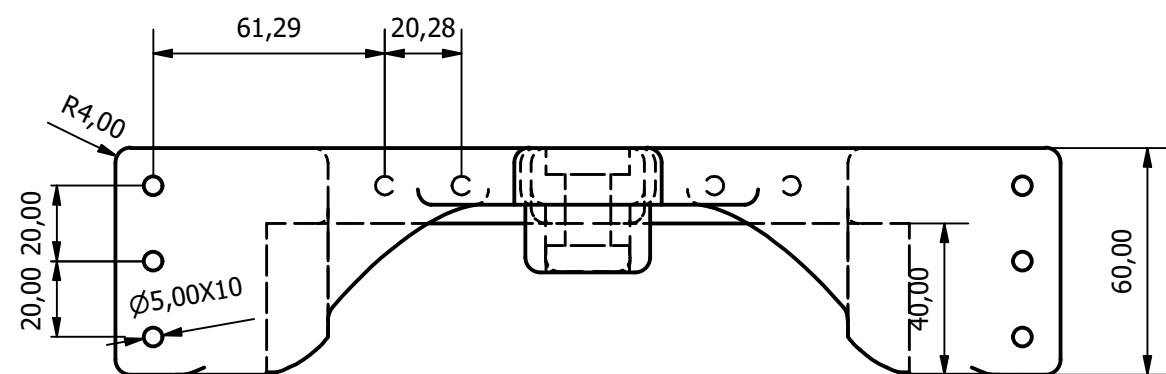
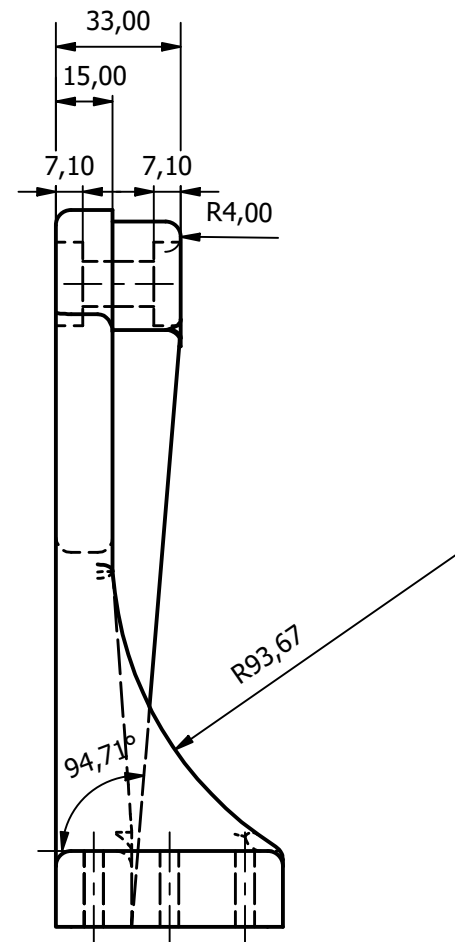
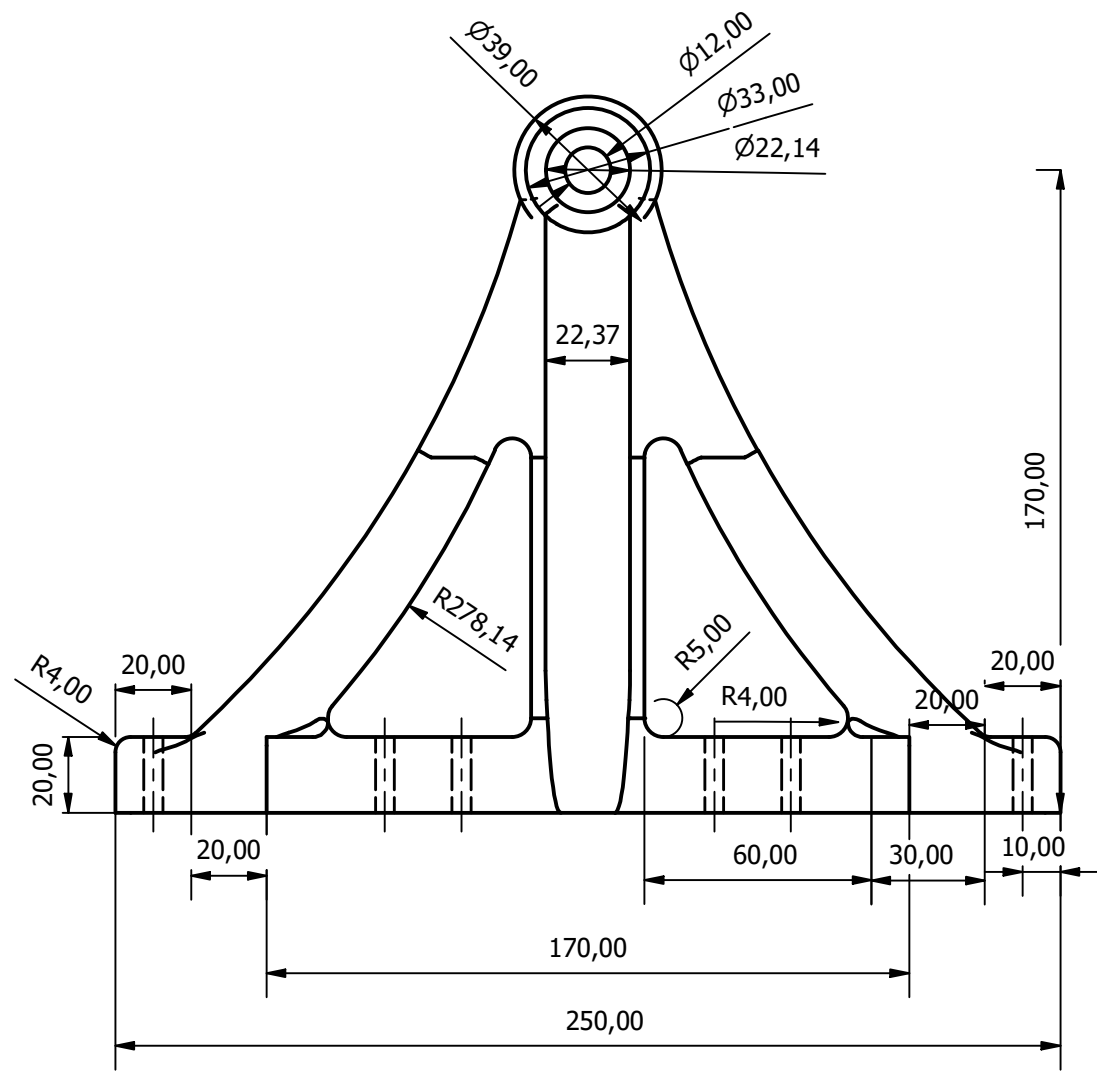


| LISTA DE PIEZAS | | | |
|-----------------|-------|------------------------------|--|
| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA | DESCRIPCIÓN |
| 1 | 2 | Perfil2020_500mm | Perfiles de aluminio cortados |
| 2 | 2 | Perfil2020_210mm | Perfiles de aluminio cortados |
| 3 | 8 | union L perfil2020 | Pieza de union en L para perfiles 2020 |
| 4 | 2 | Soporte lateral | Base para la hamaca central |
| 5 | 1 | Hamaca Central | |
| 6 | 2 | Acople para ejes 8mm | retenedores de eje de 8mm |
| 7 | 3 | Rodamiento_608ZZ | |
| 8 | 1 | AnilloColector | |
| 9 | 1 | Stepping_Motor_Nema17_Main | Motor del eje central |
| 10 | 2 | Eje 8mm diametro 90mm largo | |
| 11 | 1 | GT2_80T_8mm_Bore_Pull ey | Polea para eje basculante |
| 12 | 1 | lazySuzan | Rodamiento central de anillo |
| 13 | 1 | Conector Polea Central | |
| 14 | 1 | Acople Polea Central | |
| 15 | 1 | Polea Central | |
| 16 | 6 | Soportes Cama | |
| 17 | 6 | Resortes niveladores de cama | calibracion de cama |
| 18 | 1 | Cama | Area de impresion |

| | | | |
|-------------|---|---|------------------|
| AUTORES: | PEDRO ANDRES CARPIO RIVAS - CARLOS EDUARDO CRESPO CONSTANTE | | |
| UNIDADES: | MM | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FIMCP | |
| TOLERANCIA: | ± 0,1 | | |
| ESCALA: | 1:2 | | |
| FECHA: | 12/01/2026 | | |
| | | POSICIONADOR ROBÓTICO | MATERIAL: PLA |
| | | | Nº 1/1 |

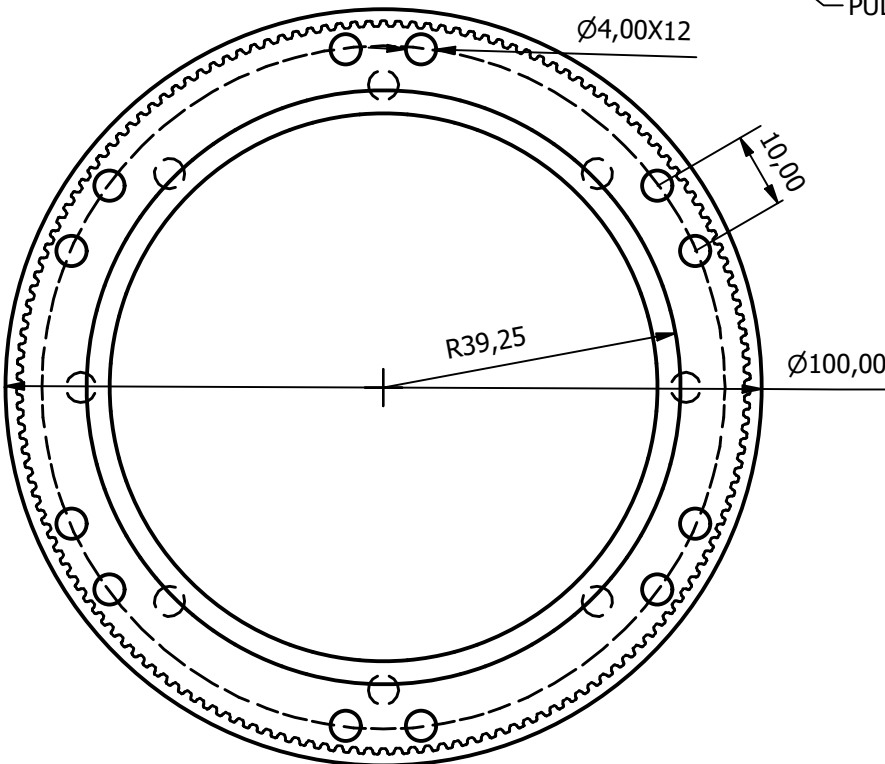
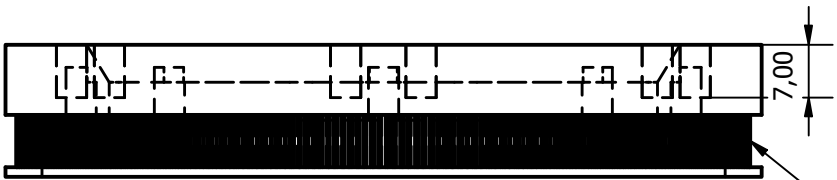
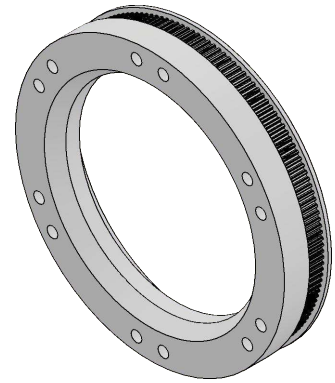
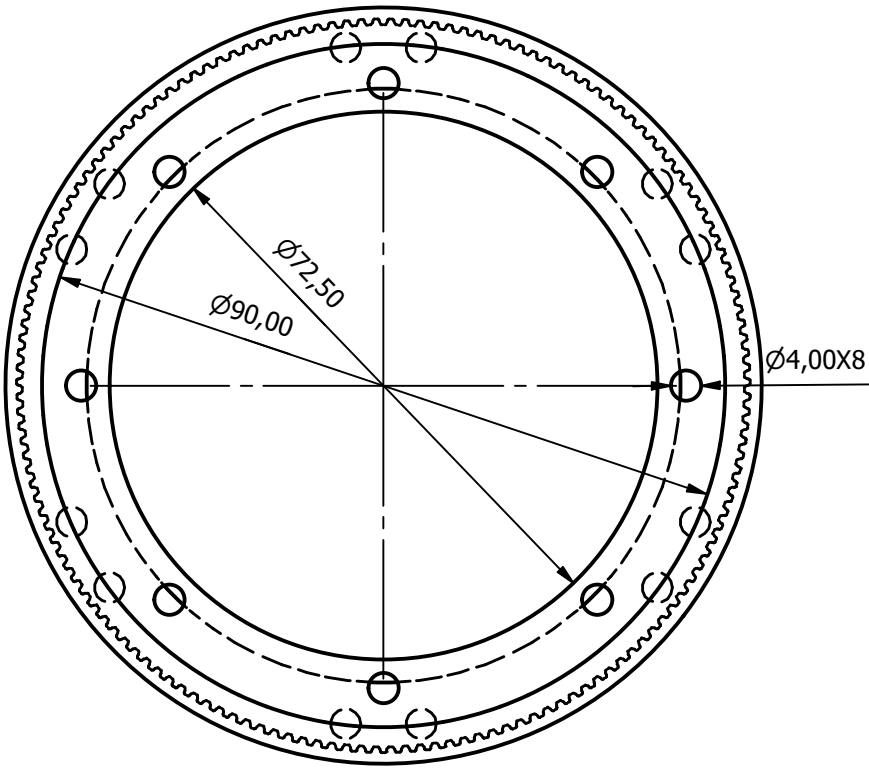


| | | |
|-------------|---|---|
| AUTORES: | PEDRO ANDRES CARPIO RIVAS - CARLOS EDUARDO CRESPO CONSTANTE | |
| UNIDADES: | MM | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FIMCP |
| TOLERANCIA: | ± 0,1 | |
| ESCALA: | 1:2 | |
| FECHA: | 12/01/2026 | |
| | HAMACA CENTRAL | MATERIAL PLA |
| | | N° 1/6 |

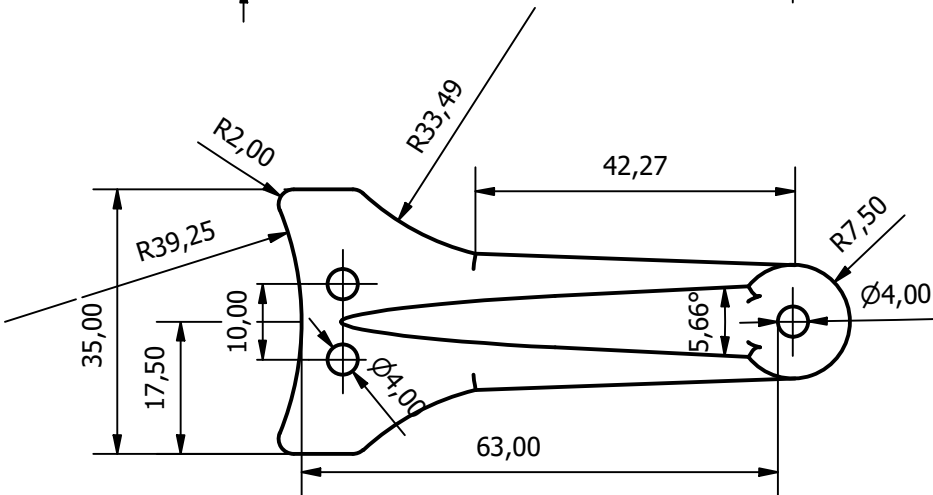
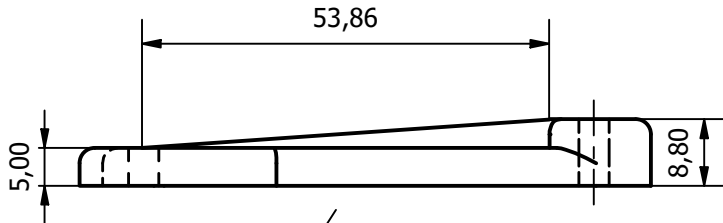
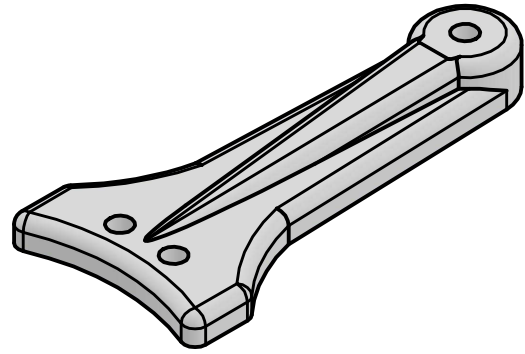


| | | |
|-------------|---|---|
| AUTORES: | PEDRO ANDRES CARPIO RIVAS - CARLOS EDUARDO CRESPO CONSTANTE | |
| UNIDADES: | MM | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FIMCP |
| TOLERANCIA: | $\pm 0,1$ | |
| ESCALA: | 1:2 | |
| FECHA: | 12/01/2026 | |
| | | MATERIAL: PLA |
| | | Nº 2/6 |

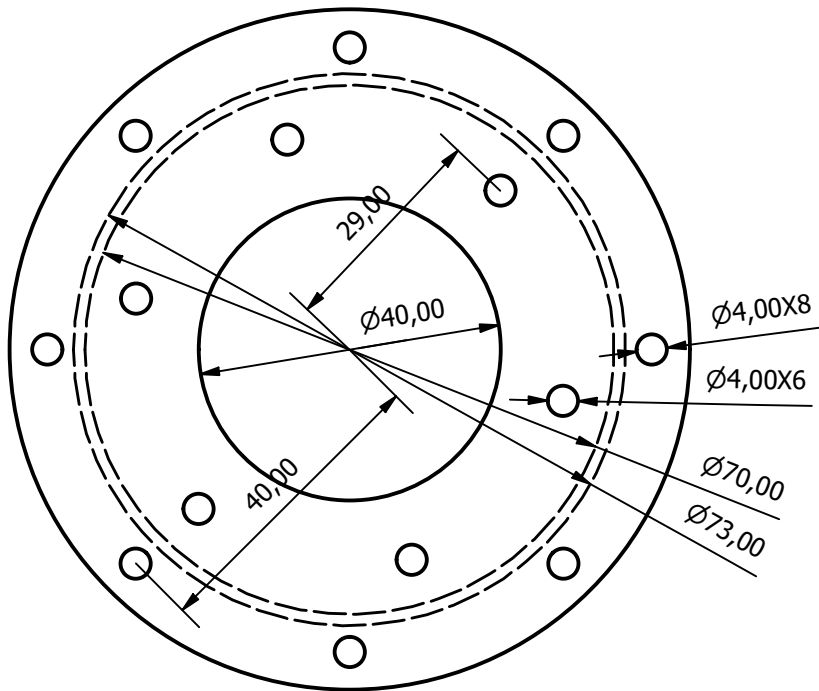
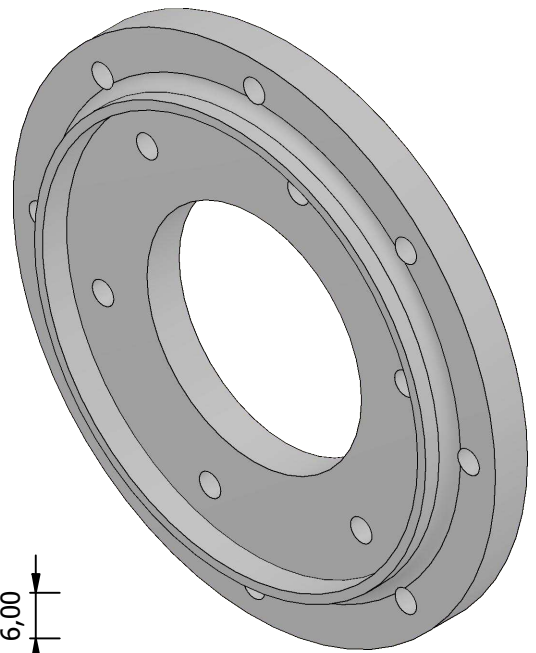
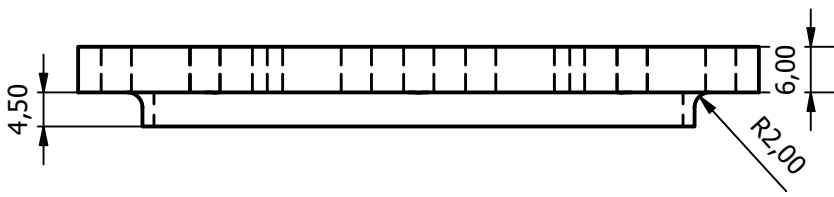
BASES LATERALES



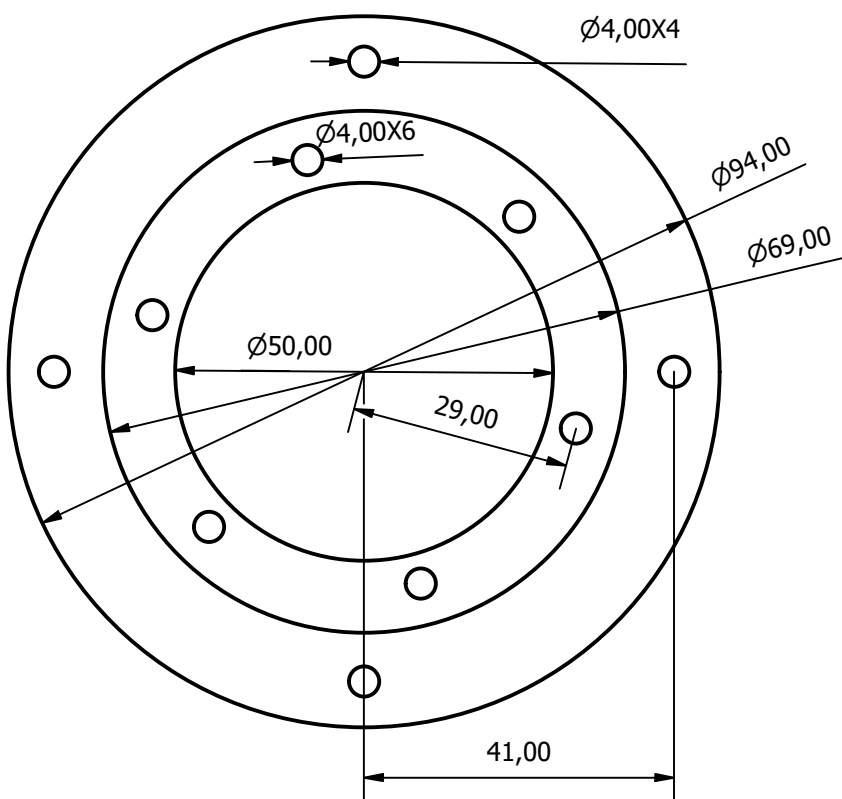
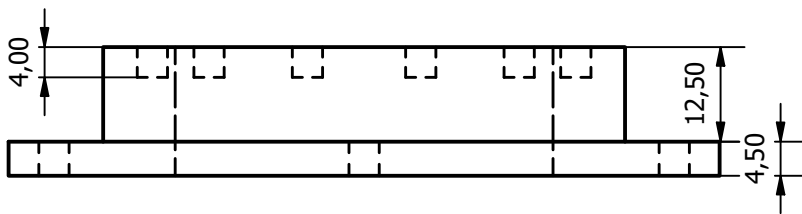
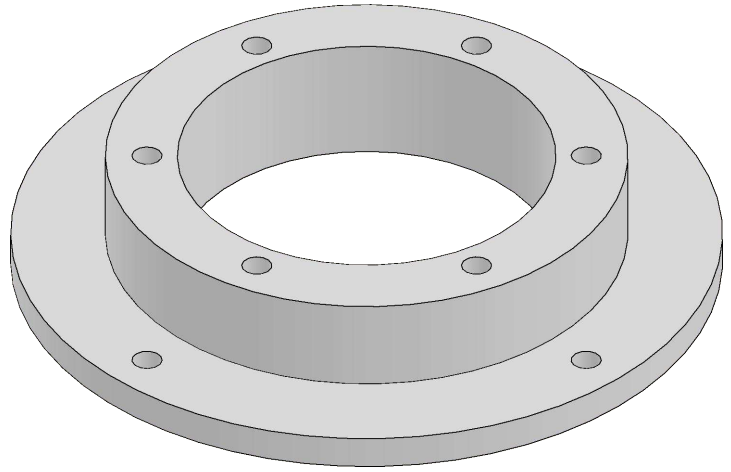
| | | | |
|-------------|---|---|------------------|
| AUTORES: | PEDRO ANDRES CARPIO RIVAS - CARLOS EDUARDO CRESPO CONSTANTE | | |
| UNIDADES: | MM | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FIMCP | |
| TOLERANCIA: | ± 0,1 | | |
| ESCALA: | 1:1 | | |
| FECHA: | 12/01/2026 | | |
| | | POLEA CENTRAL | MATERIAL: PLA |
| | | | N° 3/6 |



| | | | |
|-------------|---|---|-------------------|
| AUTORES: | PEDRO ANDRES CARPIO RIVAS - CARLOS EDUARDO CRESPO CONSTANTE | | |
| UNIDADES: | MM | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FIMCP | |
| TOLERANCIA: | ± 0,1 | | |
| ESCALA: | 1:1 | | |
| FECHA: | 12/01/2026 | | |
| | | SOPORTE CAMA | MATERIAL: PETG |
| | | | N° 4/6 |



| | | | |
|-------------|---|---|------------------|
| AUTORES: | PEDRO ANDRES CARPIO RIVAS - CARLOS EDUARDO CRESPO CONSTANTE | | |
| UNIDADES: | MM | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FIMCP | |
| TOLERANCIA: | $\pm 0,1$ | | |
| ESCALA: | 1:1 | | |
| FECHA: | 12/01/2026 | | |
| | | ACOPLE POLEA CENTRAL | MATERIAL: PLA |
| | | | N° 5/6 |



| | | | |
|-------------|---|---|------------------|
| AUTORES: | PEDRO ANDRES CARPIO RIVAS - CARLOS EDUARDO CRESPO CONSTANTE | | |
| UNIDADES: | MM | ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FIMCP | |
| TOLERANCIA: | ± 0,1 | | |
| ESCALA: | 1:1 | | |
| FECHA: | 12/01/2026 | | |
| | | CONECTOR POLEA CENTRAL | MATERIAL: PLA |
| | | | Nº 6/6 |