

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**Escuela de Ingeniería Mecatrónica**



**Rediseño del Robot Móvil Atta-Bot para la educación STEM en  
entornos de alta manipulación.**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero/a en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Jimena Murillo Vargas**

**Cartago, 19 de Noviembre de 2024**



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 19 de Noviembre de 2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'JMV', with a long horizontal stroke extending to the right.

Jimena Murillo Vargas

Ced: 1-1809-0885

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Jimena Murillo Vargas.

Proyecto: Rediseño del Robot Móvil Atta-Bot para la educación STEM en entornos de alta manipulación.



---

MSc. -Ing. Juan Carlos Brenes Torres

Asesor

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Jimena Murillo Vargas

Proyecto: Rediseño del Robot Móvil Atta-Bot para la educación STEM en entornos de alta manipulación.

Miembros del jurado evaluador

JUAN LUIS CRESPO MARIÑO (FIRMA)  
PERSONA FISICA, CPF-08-0113-0166.  
Fecha declarada: 19/11/2024 03:07:03 PM  
Esta es una representación gráfica únicamente,  
verifique la validez de la firma.



Firmado digitalmente por RONALD  
JOSE LOAIZA BALDARES (FIRMA)  
Fecha: 2024.11.19 15:42:57 -06'00'

---

Dr. -Ing. Juan Luis Crespo Mariño

Jurado

---

Ing. Ronald Loaiza Baldares

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 19 de Noviembre de 2024.

## Resumen

El rediseño del Atta-Bot STEM se centró en transformar el robot educativo en una herramienta más precisa, segura y funcional para entornos de aprendizaje. A través de un análisis técnico, se identificaron áreas de mejora que llevaron al desarrollo de un chasis robusto, diseñado para soportar el uso constante y facilitar la integración de herramientas educativas, incluso en condiciones de alta manipulación.

Una de las principales mejoras es la incorporación de un marcador, que permite al robot realizar actividades de trazado y dibujo, enriqueciendo su funcionalidad en la enseñanza. Además, se implementó un algoritmo de control proporcional-integral (PI), sustentado matemáticamente, que optimiza la precisión en los movimientos del robot, contribuyendo a un funcionamiento eficiente en diversas aplicaciones. La validación del prototipo demostró que cumple con los estándares técnicos establecidos, confirmando su aptitud como recurso didáctico en la enseñanza de conceptos STEM.

**Palabras Clave:** Robótica Educativa, Atta-Bot STEM, Controlador PI, Chasis, Dibujo interactivo.

## **Abstract**

The redesign of the Atta-Bot STEM focused on transforming the educational robot into a more precise, safe and functional tool for learning environments. Through a technical analysis, areas of improvement were identified that led to the development of a robust chassis designed to withstand constant use and facilitate the integration of educational tools, even under conditions of high manipulation.

One of the main improvements is the incorporation of a marker that allows the robot to perform tracing and drawing activities, enriching its educational functionality. In addition, a mathematical Proportional-Integral (PI) control algorithm has been implemented to optimize the precision of the robot's movements. This contributes to its efficient operation in various applications. The validation of the prototype showed that it meets the established technical standards, confirming its suitability as a teaching tool for STEM concepts.

**Keywords:** Educational Robotics, Atta-Bot STEM, PI Controller, Chassis, Interactive Drawing.

# **Dedicatoria**

*A mi mamá, Dra. Ana Lorena Vargas Cubero.*

## **Agradecimientos**

Primero que todo, agradezco a Dios. A mi mamá, por su amor incondicional y apoyo constante, siempre a mi lado. A mi papá y a mi familia. Gracias.

# Tabla de contenidos

Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tablas.....	v
Lista de abreviaciones.....	vi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes del Proyecto.....	1
1.2 Descripción del problema a resolver.....	2
1.3 Síntesis del problema.....	2
1.4    Objetivos.....	3
1.4.1 General.....	3
1.4.2 Específicos.....	3
1.5 Estructura del documento.....	3
Capítulo 2. Marco Teórico.....	5
2.1 Robótica.....	5
2.1.1 Definición.....	5
2.1.2 Tipos de robots.....	6
2.1.3 Áreas de aplicación de robots.....	8
2.2 Robótica Educativa.....	9
2.2.1 Robótica Educativa en Costa Rica.....	10
Capítulo 3. Marco Metodológico.....	12
3.1 Diagnóstico del Atta-Bot STEM.....	12
3.2 Definición de necesidades.....	16
3.3 Establecimiento de las especificaciones.....	18
3.4 Exploración y generación de conceptos.....	26
3.5 Combinación, filtrado y evaluación de conceptos.....	43
Capítulo 4. Propuesta de diseño.....	47
4.1 Diseño del control.....	47
4.2 Diseño del mecanismo para herramienta de dibujo.....	53
4.3 Diseño del sujetador para el marcador.....	56

4.4 Diseño del chasis externo e interno.....	57
4.5 Implementación de la solución en el código.....	61
Capítulo 5. Resultados y análisis.....	64
5.1 Pruebas de validación.....	64
5.1.1 Prueba de validación #1.....	64
5.1.2 Prueba de validación #2.....	67
5.1.3 Prueba de validación #3.....	72
5.1.4 Prueba de validación #4.....	74
5.1.5 Prueba de validación #5.....	74
5.1.6 Prueba de validación #6.....	75
5.2 Rúbrica.....	76
5.3 Análisis económico.....	77
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....	80
6.1 Conclusiones.....	80
6.2 Recomendaciones.....	81
Bibliografía.....	82
Apéndices.....	87

## Lista de Figuras

Figura 1. Esquema eléctrico de la primera versión del Atta-Bot. [25] .....	14
Figura 2. Matriz de necesidades.....	19
Figura 3. Primera versión del Atta-Bot STEM. ....	23
Figura 4. Diagrama de caja negra general .....	26
Figura 5. Descomposición funcional .....	26
Figura 6. Árbol de clasificación de conceptos de convertir energía a movimiento lineal. ....	27
Figura 7. Micro actuador lineal [31]. ....	28
Figura 8. Micromotor a pasos [32]. ....	28
Figura 9. Servomotor lineal [33]. ....	29
Figura 10. Solenoide lineal [34]. ....	29
Figura 11. Árbol de clasificación de conceptos de control. ....	31
Figura 12. Controlador PID [36]. ....	32
Figura 13. Controlador PI [37]. ....	32
Figura 14. Controlador por REI [39]. ....	33
Figura 15. Controlador I-PD [40]. ....	34
Figura 16. Robot Educativo Beebot [41]. ....	34
Figura 17. Juguete – Robot Educativo LEGO Mindstorm [42]. ....	35
Figura 18. Árbol de clasificación de conceptos de método de manufactura del chasis. ....	38
Figura 19. Árbol de clasificación de conceptos de material para el chasis. ....	38
Figura 20. Cuadro Ashby de modulo elástico vs densidad del material [49]. ....	41
Figura 21. Clip/Prensa para marcador [50]. ....	42
Figura 22. Adaptador para lápiz para compás [51]. ....	42
Figura 23. Sujetador metálico para lapicero [52]. ....	42
Figura 24. Árbol de clasificación de conceptos de sujetador del marcador. ....	43
Figura 25. Gráfica del comportamiento de los motores ante una entrada PWM de 150. ....	47
Figura 26. Método gráfico para obtener variables del control PI por Ziegler-Nichols [55]. ....	49
Figura 27. Gráfica de la respuesta de la planta ante una entrada escalón. ....	49
Figura 28. Gráfica de la respuesta de la planta con el control PI mediante Ziegler-Nichols ante una entrada escalón. ....	50
Figura 29. Lugar de las raíces de la planta. ....	51
Figura 30. Lugar de las raíces de la planta con el controlador PI. ....	52
Figura 31. Gráfica de la respuesta de la planta con el control PI por medio de modificación del lugar de las raíces ante una entrada escalón. ....	52
Figura 32. Engrane para el mecanismo de la herramienta. ....	54
Figura 33. Cremallera para el mecanismo del marcador. ....	54
Figura 34. Soporte para la cremallera en el mecanismo para la herramienta. ....	55
Figura 35. Mecanismo de herramienta para sujetar un marcador y dibujar en superficies. ....	56
Figura 36. Prensa para sujetar el marcador y acoplarlo al mecanismo de la herramienta. ....	57
Figura 37. Parte externa del chasis para el Atta-Bot STEM. ....	58
Figura 38. Nivel inferior/base del chasis interno para el Atta-Bot STEM. ....	59
Figura 39. Nivel Superior del chasis interno para el Atta-Bot STEM. ....	59

Figura 40. Gráfica sobre datos teóricos vs experimentales de las distancias lineales ejecutados por el Atta-Bot STEM. ....	62
Figura 41. Diagrama de caja de bigotes para la distancia lineal de 50 mm. ....	65
Figura 42. Diagrama de caja de bigotes para la distancia lineal de 100 mm. ....	65
Figura 43. Diagrama de caja de bigotes para la distancia lineal de 150 mm. ....	66
Figura 44. Diagrama de caja de bigotes para la distancia lineal de 200 mm. ....	66
Figura 45. Diagrama de caja de bigotes para la distancia lineal de 300 mm. ....	67
Figura 46. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 45°. ....	68
Figura 47. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 90°. ....	69
Figura 48. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 120°. ....	69
Figura 49. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 180°. ....	70
Figura 50. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 270°. ....	70
Figura 51. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 360°. ....	71
Figura 52. Simulación de la resistencia del chasis ante una caída desde 90 cm con el peso actual del Atta-STEM (450 g). ....	73
Figura 53. Simulación de factor de seguridad a partir de los resultados de la simulación mostrada en la figura 52. ....	73

## Lista de Tablas

Tabla 1. Características generales de la primera versión del robot Atta-Bot STEM. ....	12
Tabla 2. Resumen de los componentes o sistemas de la primera versión del robot Atta-Bot STEM. ....	12
Tabla 3. Costo del robot desglosado. ....	13
Tabla 4. Necesidades del cliente y su importancia relativa .....	17
Tabla 5. Escala de clasificación de la normativa IK. [26].....	20
Tabla 6. Especificaciones objetivo.....	25
Tabla 7. Combinación de conceptos para electrónica y control.....	44
Tabla 8. Combinación de conceptos para mecánica y manufactura. ....	44
Tabla 9. Matriz de selección de conceptos para el proceso enfocado en electrónica y control. ..	45
Tabla 10. Matriz de selección de conceptos para el proceso enfocado en mecánica y manufactura. .....	45
Tabla 11. Matriz de evaluación de conceptos para el proceso enfocado en electrónica y control.	46
Tabla 12. Matriz de evaluación de conceptos para el proceso enfocado en mecánica y manufactura.....	46
Tabla 13. Comparativa entre los dos métodos propuestos para obtener los parámetros del control PI. ....	53
Tabla 14. Datos de calibración para el factor de corrección por inercia. ....	62
Tabla 15. Resumen y estadísticas de los resultados de la validación #1.....	64
Tabla 16. Resumen y estadísticas de los resultados de la validación #2.....	68
Tabla 17. Datos promedio de los resultados obtenidos en la prueba de validación #4. ....	74
Tabla 18. Resumen de los resultados obtenidos en la prueba de validación #6.....	75
Tabla 19. Rúbrica de evaluación según métricas cumplidas o no cumplidas. ....	77
Tabla 20. Análisis económico del proyecto. ....	79

## **Lista de abreviaciones**

3D: Tres dimensiones

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno

AGV: Vehículo guiado automáticamente

AMR: Vehículo móvil autónomo

CNC: Control numérico por computadora

DC: Corriente continua

GPa: Gigapascal

I-PD: Integral-proporcional derivativo

Ki: Ganancia integral

Kp: Ganancia proporcional

LCD: Pantalla de cristal líquido

MEP: Ministerio de Educación Pública (Costa Rica)

PETG: Tereftalato de polietileno glicol

PLA: Ácido poliláctico

PID: Proporcional-integral-derivativo

PI: Proporcional-integral

PMMA: Polimetilmetacrilato

PROE: Planificación de rutas óptimas por medio de enjambres

PWM: Modulación por ancho de pulsos

REI: Red de educación integral

STEM: Ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas

TEC: Instituto Tecnológico de Costa Rica

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes del Proyecto

El proyecto Atta-Bot STEM es una iniciativa del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), iniciada en 2019 como evolución del proyecto PROE y desarrollada en colaboración entre la Escuela de Matemática y la Escuela de Ingeniería Mecatrónica. Su objetivo principal es promover la educación pública en áreas STEM mediante el desarrollo de una plataforma robótica. El equipo, coordinado por Cindy Calderón Arce junto a los investigadores Rebeca Solís Ortega, Juan Carlos Brenes Torres y Dylana Freer Paniagua, ha estructurado el proyecto en tres etapas:

- **Generación de robots educativos:** Se enfoca en diseñar y desarrollar robots para entornos educativos.
- **Diseño de planes de estudio:** Crea materiales didácticos que complementen el uso de los robots en diversas áreas STEM y niveles educativos.
- **Implementación en colegios y escuelas:** Involucra la integración de los robots en instituciones educativas mediante pruebas piloto, capacitación de docentes y apoyo continuo.

Actualmente, el proyecto se encuentra en la primera etapa y busca que este desarrollo contribuya al objetivo general del Atta-Bot STEM. Paralelamente, a inicios del 2024 se lanzó el programa Nacional de Formación Tecnológica [1]. Esta iniciativa del MEP tiene como objetivo asesorar y guiar a las instituciones en la integración de tecnologías en sus prácticas pedagógicas. Además, el ministerio anunció una nueva asignatura enfocada en programación, ciencia de datos, inteligencia artificial y robótica [2], aprovechando la experiencia, infraestructura y conocimientos adquiridos de programas previos para ofrecer una propuesta educativa unificada, sólida y efectiva.

Sin embargo, a pesar de la visión del programa, el proyecto enfrenta desafíos significativos debido a los recortes en el presupuesto educativo, los cuales han limitado la adquisición de equipos esenciales para la implementación [3]. Aquí es donde los Atta-Bots STEM pueden jugar un papel, ya que, debido a su fabricación nacional y su diseño de hardware y software abiertos, ofrecen una alternativa de bajo costo que puede adaptarse a diversas realidades educativas en el país. Estos

robots están diseñados para ser intuitivos y fáciles de manejar, de modo que los estudiantes puedan explorarlos sin dificultad, lo cual facilita su comprensión y uso práctico.

En resumen, Atta-Bot STEM no solo es un proyecto de innovación robótica, sino también una herramienta para apoyar la transformación digital en las aulas costarricenses, potenciando el aprendizaje práctico y la motivación de los estudiantes hacia las áreas STEM.

### **1.2 Descripción del problema a resolver**

En el proyecto Atta-Bot STEM se tomó como base el robot de enjambre desarrollado en el proyecto PROE. Cuyo diseño estaba pensado para el desarrollo de actividades de investigación en el área de robótica de enjambres, por lo cual implementar este robot sin ninguna modificación previa a un entorno educativo no compaginaba con las funcionalidades esperadas.

Es así como, durante el primer semestre de 2024, como parte de otro proyecto final de graduación, se trabajó en el rediseño del Atta-Bot STEM en temas de electrónica y programación. Sin embargo, desde el proyecto Atta-Bot STEM, se han identificado otras áreas de necesidad, como la robustez, el diseño del chasis y el control de movimientos, para que pueda ser utilizado en un entorno educativo de manipulación constante

### **1.3 Síntesis del problema**

A pesar de que la versión actual del robot Atta-Bot STEM se originó a partir del rediseño del robot de enjambre utilizado en el proyecto PROE con el objetivo de adaptarlo a entornos educativos, este continúa presentando necesidades en términos de robustez, diseño de un chasis y control de movimientos para que sea utilizado un entorno educativo de manipulación constante.

Por tanto, es necesario una segunda aproximación en el rediseño para que esta plataforma robótica llegue a cumplir con las funcionalidades que habiliten una herramienta eficiente para el fomento de las habilidades STEM en el entorno mencionado.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 General**

1. Adaptar el robot educativo del proyecto Atta-Bot STEM para que sea preciso, protegido y con mayor funcionalidad, para un entorno educativo de manipulación constante, que el prototipo actual.

### **1.4.2 Específicos**

- 1.1 Evaluar el robot Atta-Bot STEM en función de los criterios clave para un robot educativo efectivo para el diagnóstico de falencias.
- 1.2 Diseñar un chasis protector para que sea adecuado en un entorno de enseñanza.
- 1.3 Diseñar un algoritmo de control que mejore la precisión de los movimientos del robot ante condiciones de uso delimitadas.
- 1.4 Validar el rediseño del robot Atta-Bot STEM para la comprobación del cumplimiento de los estándares educativos y técnicos establecidos en el proyecto Atta-Bot STEM.

## **1.5 Estructura del documento**

La metodología se basará en el enfoque de Ulrich y Eppinger plasmada en su libro “Diseño y desarrollo de productos” [4], con la que se buscará asegurar que los Atta-Bots STEM estén adaptados para maximizar su efectividad en el fomento de habilidades STEM en ambientes pedagógicos.

El primer paso en el desarrollo del proyecto consiste en definir el problema mediante una lista de requerimientos del cliente, en este caso los investigadores del proyecto Atta-Bot STEM, así como una descripción detallada de la función del producto final y sus características necesarias.

El segundo paso involucra recopilar información relevante para el diseño en función del problema específico. La búsqueda y análisis de información es crucial para el proceso de diseño, ya que permite identificar errores y problemas en la definición o aproximación del problema. Es esencial utilizar fuentes de información confiables, como normas, manuales y textos provenientes de sitios de reconocida solvencia académica. Para el proyecto Atta-Bot STEM, esto puede incluir investigación sobre robótica educativa, análisis de las necesidades curriculares en áreas STEM y revisión de tecnologías existentes en el ámbito educativo.

En la tercera etapa, se plantean múltiples soluciones. Esto implica una síntesis de ideas nuevas, herramientas y métodos para llegar a una posible solución. La creatividad es crucial en este proceso, y es importante tener una visión completa del problema para plantear diversas soluciones. En el caso del Atta-Bot STEM, esto puede incluir el rediseño de hardware y software para mejorar la robustez y funcionalidad de los robots, asegurando que sean aptos para entornos didácticos.

Además, se debe realizar un estudio exhaustivo de las propuestas y verificar cuál cumple con las especificaciones del proyecto Atta-Bot STEM. En esta fase, se aplican conocimientos ingenieriles para decidir cuál es la mejor opción. Un método para formalizar esta decisión es mediante matrices de decisión. En estas, se implementa una escala y se asigna una puntuación a cada atributo deseable en la solución. Basándose en estos factores y en las puntuaciones asignadas a cada solución, se obtiene una nota final que valida la selección.

La fase final corresponde a la implementación de la solución mediante simulaciones, pruebas de concepto, un prototipo del diseño funcional, o una combinación de estas opciones. Se realizan pruebas para verificar su funcionalidad, resistencia estructural y otros aspectos, que se definirán según la naturaleza del proyecto y sus áreas de diseño principales.

A partir de estas pruebas se pueden idear mejoras y realizar cambios de lo realizado, si es necesario. Es importante mencionar que este es un proceso iterativo, por lo que en cualquier punto del proceso de diseño se puede regresar a la etapa anterior para hacer ajustes y mejoras según los resultados obtenidos.

# Capítulo 2. Marco Teórico

## 2.1 Robótica

### 2.1.1 Definición

La definición de un robot ha sido tema de discusión desde la aparición de la palabra "robot" en el idioma inglés en 1921, proveniente del término checo “robot”, que significa servidumbre o trabajo forzado [5] La complejidad para definir lo que es un robot se refleja en diversas descripciones, como las siguientes:

- Un robot es considerado un mecanismo programado y actuado con un grado de autonomía para realizar locomoción, manipulación o posicionamiento [6].
- Es visto también como un sistema mecánico diseñado para controlar su capacidad de percepción y acción, con el fin de alcanzar metas en el mundo físico [7].
- Igualmente, un robot se define como un dispositivo con capacidad agente, destinado a actuar en el mundo físico para cumplir una o más tareas [8].

A partir de estas definiciones, podemos observar que los conceptos de autonomía, control, y propósito son elementos comunes que configuran la esencia de lo que significa un robot. En la primera definición, se enfatiza la autonomía parcial del mecanismo, permitiéndole realizar acciones específicas como moverse o manipular objetos. La segunda definición complementa esta perspectiva al subrayar que un robot debe ser capaz de interactuar con su entorno mediante sensores y actuadores, lo que le permite cumplir objetivos en el mundo físico. Finalmente, la tercera definición se centra en la función del robot como un agente que lleva a cabo tareas concretas, una idea vinculada al origen del término que remite al concepto de servicio o trabajo.

En conjunto, estas definiciones apuntan a que un robot es más que una simple máquina. Es un sistema autónomo que, mediante el control y la percepción de su entorno, cumple con tareas predefinidas o adaptativas. Este enfoque integral subraya la importancia de la capacidad de un robot para no solo ejecutar acciones programadas, sino también para adaptarse y responder a su entorno, lo que le permite alcanzar los objetivos para los cuales ha sido diseñado.

Siguiendo en la misma línea, la robótica como disciplina ha sido definida desde diversas perspectivas que resaltan tanto su naturaleza interdisciplinaria como su propósito práctico. En una primera instancia, se describe a un robot como una máquina reprogramable que es capaz de llevar a cabo múltiples tareas, ya sea de forma autónoma o bajo control remoto. La programación de estos robots se puede ajustar según las necesidades y la voluntad humana [9].

Por otro lado, se presenta la robótica como una ciencia que integra la ingeniería y la computación, enfocándose en la creación y ensamblaje de robots físicos que potencian la automatización y promueven la creatividad. Esta definición subraya que el campo de la robótica abarca tanto la construcción como el uso de robots en entornos tangibles, destacando así su papel en el avance de tecnologías aplicadas [10].

A partir de estas, se puede considerar la robótica como un área del conocimiento que combina la ingeniería y la ciencia de la computación para diseñar, programar y fabricar robots. Estos robots son máquinas reprogramables, capaces de desempeñar tareas de manera autónoma o mediante control remoto, con el fin de mejorar la automatización e impulsar la innovación. En este contexto, el objetivo de la robótica es no solo entender y crear estas máquinas, sino también integrarlas de manera efectiva en su entorno, optimizando así su interacción y funcionalidad dentro de diversos ámbitos de aplicación.

### **2.1.2 Tipos de robots**

A medida que avanza la tecnología, los robots son cada vez más frecuentes en diversos sectores y aplicaciones. Desde la navegación autónoma hasta tareas complejas estos se están diseñando para realizar una amplia gama de funciones.

Los robots pueden clasificarse en función de su movilidad:

- De ubicación fija: Son estacionarios y realizan tareas dentro de un área específica.
- De ubicación no fija o móviles: Se caracterizan por que pueden moverse por su entorno para realizar tareas.

Otra clasificación es la basada en las capacidades robóticas, como se describe en los siguientes párrafos:

- Robots móviles autónomos (AMR): Estos son robots que navegan sin colisiones mediante un proceso descentralizado de toma de decisiones. Realizan tareas como manipulación de materiales, colaboración y operaciones de servicio completo. Los AMR tienen la capacidad de planificar sus rutas de forma autónoma y adaptarse a los cambios del entorno, lo que ofrece una mayor flexibilidad y eficiencia. Equipados con hardware y software de control avanzados. Además, operan eficazmente en entornos dinámicos sin supervisión humana [11].
- Vehículos de guiado automático (AGV): Estos robots suelen ser diseñados para transportar materiales y mercancías dentro de una instalación. Siguen trayectorias predeterminadas, que pueden estar definidas por guías físicas. Los AGV suelen utilizarse para tareas de transporte repetitivas en entornos como plantas de fabricación, almacenes y centros de distribución. A diferencia de los AMR, estos no tienen capacidad para navegar libremente o adaptarse a los cambios de su entorno; dependen de rutas fijas y de un control centralizado para la programación y las decisiones de ruta. Requieren supervisión humana para su funcionamiento y la gestión de errores [11], [12].
- Robots Articulados: A menudo denominados brazos robóticos, imitan los movimientos de un brazo humano. Con múltiples articulaciones, pueden realizar tareas como soldadura, manipulación de materiales y cuidado de máquinas, entre otras. [13].
- Humanoides: Los robots humanoides están diseñados para parecerse a los humanos e interactuar con ellos. Pueden dar indicaciones, ofrecer servicios de conserjería y realizar otras tareas centradas en el ser humano [10], [14]
- Cobots: Los cobots están diseñados para colaborar con los humanos, compartiendo espacios de trabajo y ayudando en las tareas. Pueden ayudar en actividades repetitivas, peligrosas o extenuantes [15].
- Híbridos: Los robots híbridos combinan elementos de distintos tipos para lograr funcionalidades más complejas. Por ejemplo, un AMR equipado con un brazo robótico puede manipular paquetes dentro de un almacén.

En conclusión, la creciente diversidad de robots, desde los estacionarios hasta los móviles y los híbridos, ha permitido su aplicación en una amplia gama de sectores. Cada tipo de robot tiene características y capacidades específicas que los hacen ideales para diferentes entornos y tareas. A medida que los robots se vuelven más avanzados, su integración en industrias como la manufactura, la logística, la atención médica y los servicios será cada vez más común. Explorar las aplicaciones prácticas de estos robots permitirá comprender mejor su impacto y potencial en el futuro de la automatización.

### **2.1.3 Áreas de aplicación de robots**

Los robots móviles y los brazos robóticos han revolucionado numerosas industrias, facilitando y optimizando procesos en sectores muy variados. A continuación, se describen algunas de las áreas de aplicación más relevantes para estos tipos de robots:

- Industria de la Logística y el Almacenamiento

Los robots móviles autónomos (AMR) se utilizan ampliamente en almacenes para tareas de transporte y manejo de mercancías. Estos robots pueden navegar por grandes espacios de almacenamiento, identificando y transportando artículos desde las estanterías hasta las estaciones de embalaje o carga, lo que reduce los tiempos de recolección y mejora la eficiencia [11]. También son comunes en centros de distribución, donde facilitan la clasificación, etiquetado y envío de productos.

- Agricultura

Los robots móviles se emplean en la agricultura para labores como la siembra, el riego y la recolección de cultivos. Los robots pueden monitorear los niveles de humedad del suelo, detectar malezas, y aplicar pesticidas de manera precisa y localizada, lo que reduce el uso de insumos y protege el medio ambiente [16].

- Sector de la Salud

La robótica médica ha revolucionado la cirugía, el diagnóstico y la rehabilitación. Los robots quirúrgicos permiten procedimientos mínimamente invasivos con mayor precisión, mientras que la tele-robótica facilita cirugías a distancia [17] [18].

- Inspección y Mantenimiento

Los robots móviles se despliegan en la inspección de infraestructuras críticas. Equipados con cámaras y sensores, pueden detectar problemas como fugas, grietas o corrosión, facilitando un mantenimiento preventivo que minimiza riesgos [19].

- Manufactura y Ensamblaje

Los brazos robóticos son indispensables en las líneas de producción. En ejemplo, en la industria automotriz, pueden realizar tareas repetitivas como el ensamblaje de piezas, soldadura y pintura con gran precisión y rapidez, aumentando la calidad del producto y reduciendo el tiempo de fabricación [20].

- Empaque y Paletización

En la industria, los robots articulados se encargan de tareas de empaquetado y paletización, manejando productos como latas, botellas y cajas [21]. Con la capacidad de trabajar a altas velocidades, estos robots aseguran que los productos sean empaquetados y organizados de manera eficiente. También se emplean en la manipulación de productos frágiles, ajustando la fuerza aplicada para evitar daños.

Otra área de aplicación es la integración de robots en la educación temprana (primaria y secundaria) está demostrando su potencial para fomentar el interés en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM). Al involucrar a los estudiantes en proyectos de robótica, se promueve el desarrollo de habilidades críticas para el futuro como la resolución de problemas y el trabajo en equipo, preparando a las nuevas generaciones para un mundo impulsado por la tecnología. En esta aplicación se profundizará por ser el aspecto medular de este proyecto.

## **2.2 Robótica Educativa**

En base a [22] la robótica educativa es el uso de robots para apoyar, facilitar y mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje en distintos contextos educativos. A través de la interacción con robots, los estudiantes pueden desarrollar habilidades y conocimientos en áreas específicas, así como mejorar su motivación y compromiso con el aprendizaje. Este enfoque utiliza la robótica no solo como una herramienta para la enseñanza de temas técnicos, sino también para impartir lecciones en otras áreas.

La importancia radica en su capacidad para ofrecer experiencias de aprendizaje personalizadas y prácticas que muchas veces superan a las de otras tecnologías. Los robots pueden adaptarse a las necesidades y habilidades individuales de cada alumno.

Otro aspecto clave de la robótica en la educación es su capacidad para superar algunas limitaciones de los humanos. Los robots, a diferencia pueden repetir una lección las veces que sea necesario, lo que los convierte en herramientas valiosas para la práctica y la repetición. Además, puede incluir estilos de comunicación personalizados y prosociales, lo cual ha demostrado ser efectivo en la motivación y en el rendimiento de los estudiantes.

Sin embargo, la introducción de robots en la educación también plantea desafíos éticos importantes. Entre las preocupaciones se encuentran temas de privacidad y el riesgo de que se reduzca el contacto humano en el entorno educativo. En resumen, la robótica educativa ofrece un enfoque innovador con el potencial de transformar la educación, aunque se deben abordar cuidadosamente sus implicaciones éticas y morales.

### **2.2.1 Robótica Educativa en Costa Rica**

En Costa Rica, la robótica educativa se ha consolidado como una herramienta esencial para el desarrollo de habilidades tecnológicas y de pensamiento crítico entre los estudiantes. Se aplican programas específicos en las escuelas, donde se usan kits de robótica para enseñar principios de programación y diseño de manera práctica. Esta metodología no solo ayuda a los alumnos a adquirir competencias tecnológicas, sino que también fomenta el trabajo en equipo y la resolución de problemas.

Proyectos como “Titibots” han surgido con el propósito de introducir a la niñez a la programación [23]. En esencia este proyecto permite que los usuarios exploren conceptos básicos de robótica mediante aplicaciones fáciles de usar, contribuyendo así a reducir la brecha tecnológica desde una edad temprana.

A nivel nacional, el Ministerio de Educación Pública (MEP) también ha promovido el uso de robótica en las aulas, mediante el proyecto de Robótica Educativa. Este enfoque está fundamentado en el aprendizaje activo, donde los estudiantes construyen y experimentan con tecnologías de forma directa, ayudándoles a desarrollar no solo destrezas técnicas, sino también habilidades sociales y creativas [24].

En conjunto, estos programas reflejan un compromiso con la preparación de las nuevas generaciones para los desafíos del mundo moderno, fomentando una educación que va más allá de lo académico y promueve una formación integral.

En resumen, tanto los robots móviles como los brazos robóticos desempeñan roles esenciales en múltiples industrias espaciales, optimizando procesos, aumentando la eficiencia y mejorando la seguridad. Su adopción continúa en expansión se prevé que sus aplicaciones seguirán creciendo, transformando más sectores y facilitando nuevas formas de trabajo y creación.

En particular, la robótica educativa hace el uso de tecnologías robóticas para facilitar el aprendizaje de estudiantes, ayudándoles a desarrollar habilidades tecnológicas y cognitivas fundamentales para enfrentar los retos del siglo XXI. En Costa Rica, esta tendencia se ha fortalecido a través de diversos programas e iniciativas que buscan introducir la robótica en los centros educativos y así fomentar una educación integral y adaptada a las necesidades actuales.

Dentro de este contexto, se destaca el Atta-Bot STEM, un robot móvil que está diseñado para ser utilizado en entornos educativos. Su propósito es permitir que los estudiantes interactúen de manera directa con la tecnología, promoviendo un aprendizaje activo y experimental. Este enfoque no solo refuerza las habilidades técnicas de los estudiantes, sino que también les permite mejorar en áreas como el trabajo en equipo y la solución de problemas.

## Capítulo 3. Marco Metodológico

### 3.1 Diagnóstico del Atta-Bot STEM

Para abordar eficazmente un problema, es esencial comenzar con una definición clara y precisa. Este paso es fundamental porque establece una base sólida. Por ello, se optó por elaborar un análisis del diseño actual del Atta-Bot STEM, enfocándose en su uso en aplicaciones de robótica educativa. Este análisis no solo permite evaluar el estado actual del Atta-Bot STEM, sino que también propone mejoras técnicas de acuerdo con los criterios que se siguen en el proyecto Atta-Bot STEM. Asimismo, facilita la identificación del problema central que se pretende abordar, lo cual es fundamental según la metodología empleada [4].

Primero, se establece que el Atta-Bot STEM es un prototipo de robot móvil terrestre diseñado para contribuir en entornos educativos. Con esto en mente, las tablas 1 y 2 presentan, respectivamente, las características generales del dispositivo y un desglose detallado de su costo, según la documentación más actualizada [25].

Tabla 1. Características generales de la primera versión del robot Atta-Bot STEM.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Dimensiones	14 x 10 x 11.5 cm
Autonomía	9 horas y 51 minutos
Masa	350 g
Velocidad	120 mm/s

Tabla 2. Resumen de los componentes o sistemas de la primera versión del robot Atta-Bot STEM.

<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Implementado</b>
Unidad de procesamiento	IdeaBoard	Sí
Fuente de alimentación	Batería de litio, 2500 mAh	Sí
Sistema de gestión de energía	PowerBoost ADA2465, Interruptor COM-CB0372	Sí
Motor DC para desplazamiento	ROB-CB1019	Sí
Tercer punto de apoyo	Ball Caster	Sí
Sistema de prevención de caídas	Sensor infrarrojo SEN-CB0005	Sí
Sistema de detección de obstáculos	Sensor infrarrojo SEN-CB0006	Sí
Sistema de agarre de objetos	Garra con servo MG90S	No
Sistema de identificación de colores y gestos	APDS9960	No
Sistema de comunicación con el usuario	Pantalla LCD-CB4557	No
Sistema de control de comandos	Botonera COM-CB1333	Sí
Método de control de movimientos	Controlador ajustado mediante ensayo y ajuste	Sí
Protección de componentes	Estructura de acrílico	Sí

Tabla 3. Costo del robot desglosado.

<b>Componentes</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Costo en CR</b>
Motor c/d con encoder	\$29.90
Batería Lipo	\$17.95
Boost Battery Manager	\$10.95
Soporte Motor	\$1.25
Ball Caster	\$2.75
IdeaBoard	\$39.95
Servomotor	\$6.95
Infrarrojo delantero	\$8.85
Infrarrojo abajo	\$3.90
Sensor de color	\$11.38
Pantalla	\$5.95
Interruptor general	\$1.25
Keypad	\$1.95
Kit conectores	\$8.95
Kits espaciadores	\$15.95
Cable	\$3.95
STEMMA QT cable	\$1.49
STEMMA QT cable macho-macho	\$1.95
<b>Total Componentes</b>	<b>\$175.27</b>
<b>Salario del investigador</b>	
Salario por hora	€ 1,200
Número de horas/semana	20
Número de semanas	16
<b>Total Salario</b>	<b>\$750</b>
<b>Activos utilizados</b>	
Software Lucid charts	\$7.95
Software Canva	\$5
Computadora portátil	\$486.08
<b>Total Activos</b>	<b>\$499.03</b>
<b>Resumen</b>	
Total Componentes	\$175.27
Investigador	\$750.00
Total Activos	\$499.03
<b>Gran Total</b>	<b>\$1,424.30</b>

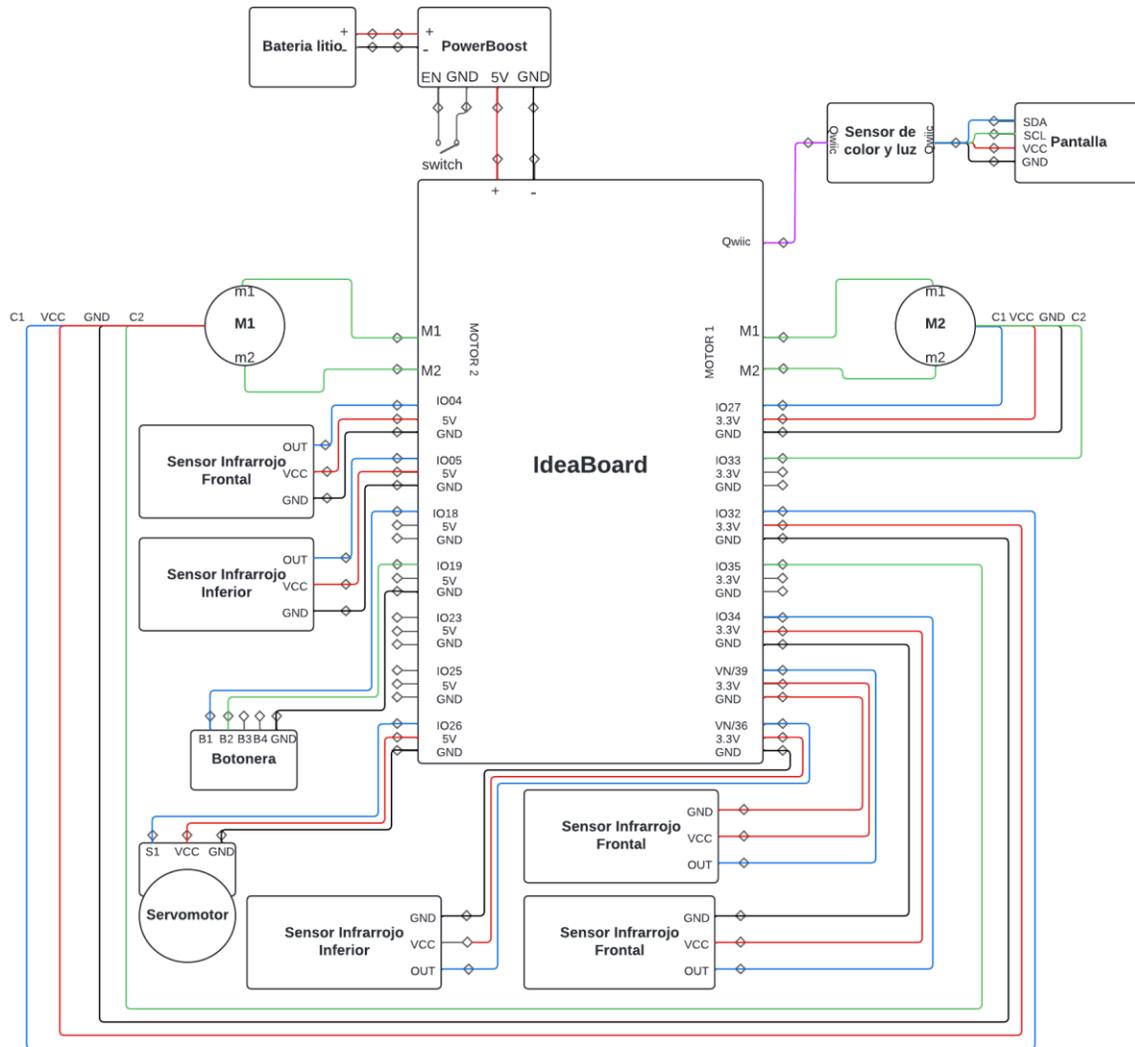


Figura 1. Esquema eléctrico de la primera versión del Atta-Bot. [25]

Con base en [25], y en conjunto con la información visualizada en las tablas 1, 2 y 3 y la figura 1, se observa que en el prototipo actual Atta-Bot STEM se implementaron varios componentes clave de manera física. Estos incluyen la IdeaBoard como la placa de microcontrolador central, y los motores DC con encoders, que permiten un control preciso del movimiento. Se integró una batería de litio de 2500mAh, acompañada de un PowerBoost para mantener el suministro de energía constante a 5V.

Además, se añadieron sensores infrarrojos para la detección de obstáculos, junto con un servomotor MG90S, que originalmente se pensó para la manipulación de una garra, que aún no se ha implementado en hardware. Componentes adicionales como la pantalla LCD y los sensores de luz y color fueron incluidos en el diseño, pero no se observa su integración física.

Igualmente, se utilizó un Ball Caster para mejorar la estabilidad, y se conectaron todos estos elementos mediante diversos cables y conectores dentro de un chasis modular que actualmente requiere de un diseño más adecuado con el ambiente educativo en el que se espera que el Atta-Bot STEM sea funcional.

Es importante señalar que, estructuralmente, el robot tiene expuestos al menos 7 de los 10 componentes electrónicos identificados. Aunque la estructura de acrílico presenta bordes redondeados, estos dejan espacios abiertos que exponen los componentes internos a posibles daños y contaminantes.

Por otro lado, el código desarrollado para el Atta-Bot STEM está diseñado para controlar las funciones básicas del robot, incluyendo el manejo de los motores DC con encoders y la detección de obstáculos mediante sensores infrarrojos. Este código implementa la lógica necesaria para el movimiento y la navegación del robot, utilizando un lazo de control PID para ajustar los giros y garantizar que se mantenga en curso. No obstante, el código carece del diseño de un algoritmo específico que se sustente en un modelo matemático detallado del comportamiento de los motores, pues el enfoque utilizado se basa principalmente en "prueba y error".

Además, el diagrama del diseño incluye componentes como la pantalla LCD, la garra, y los sensores de luz y color, pero el código no integra funciones para controlar estos elementos, dejándolos inactivos en el prototipo actual y consecuentemente no pueden ser utilizados.

En conclusión, el diagnóstico del Atta-Bot STEM ha permitido identificar y analizar las características actuales del prototipo, así como los componentes integrados y su funcionalidad en el contexto de la robótica educativa. Este análisis establece un punto de partida sólido para las futuras mejoras. A continuación, se presentarán las necesidades identificadas a partir de este diagnóstico y la entrevista realizada con el cliente, las cuales guiarán el desarrollo de la segunda versión del robot educativo.

### 3.2 Definición de necesidades

Para determinar las necesidades del robot móvil, se realizó un análisis técnico y se complementó con entrevistas al cliente. En este proceso, se revisaron las capacidades y funciones que el robot debe tener para cumplir con lo que se espera de él. Con esta evaluación, se consideraron aspectos clave como el control, la precisión y la adaptabilidad del robot. Esto ayudó a definir las características esenciales que guiarán su desarrollo, centrándose en su movimiento, control y en la capacidad de realizar tareas específicas. A continuación, se detallan las necesidades identificadas.

1. Chasis modular que permita una fácil modificación y actualización de componentes.
2. Materiales adecuados que ofrezcan una alta resistencia y durabilidad.
3. Soporte y mecanismo adecuado para la herramienta a incorporar, asegurando su correcta operación y funcionalidad en tareas de manipulación.
4. Función de control en el código que permita la operación de la herramienta a diseñar.
5. Componentes del robot (motores, baterías, sensores) firmemente fijados al chasis.
6. Chasis que minimice el riesgo de volcaduras durante el movimiento.
7. Chasis para mejorar la estabilidad y el rendimiento del Atta-Bot STEM.
8. Movimientos del robot precisos, tanto en giros como en avances o retrocesos.
9. Chasis que facilite el acceso a componentes para mantenimiento y actualizaciones.
10. Herramienta que sea intuitiva y sencilla de utilizar.
11. Chasis que permita el apilamiento seguro de múltiples unidades.
12. Chasis sin bordes afilados y con formas redondeadas para hacerlo más amigable y seguro al tacto.

En una segunda entrevista con el cliente, se aclaró que la herramienta deseada es un marcador para dibujar en superficies. Esta elección se debe a la recomendación de un especialista en robótica educativa, quien sugirió esta opción. Por lo tanto, se plantearon necesidades específicas relacionadas con esta función.

13. Fácil montaje y desmontaje del marcador en el actuador.
14. Mecanismo para ajustar la altura del marcador.
15. Soporte del marcador que mantenga una posición estable y constante durante el proceso de dibujo.

Posteriormente, se compartió una encuesta con el cliente para que evaluara la prioridad de cada necesidad identificada. En la encuesta, se le pidió que calificara cada aspecto en una escala del 1 al 5, donde 5 indica que la necesidad es indispensable y 1 que no es necesaria en absoluto. Esta evaluación permitió entender mejor las expectativas del cliente y enfocar el desarrollo en las áreas más importantes.

Tabla 4. Necesidades del cliente y su importancia relativa

Necesidad	Prioridad
Materiales adecuados que ofrezcan una alta resistencia y durabilidad.	5
Soporte y mecanismo adecuado para la herramienta a incorporar, asegurando su correcta operación y funcionalidad en tareas de manipulación.	5
Función de control en el código que permita la operación de la herramienta a diseñar.	5
Componentes del robot (motores, baterías, sensores) firmemente fijados al chasis.	5
Chasis que minimice el riesgo de volcaduras durante el movimiento.	5
Chasis para mejorar la estabilidad y el rendimiento del Atta-Bot.	5
Movimientos del robot precisos, tanto en giros como en avances o retrocesos.	5
Chasis modular que permita una fácil modificación y actualización de componentes.	4
Herramienta que sea intuitiva y sencilla de utilizar.	4
Fácil montaje y desmontaje del marcador en el actuador.	4
Mecanismo para ajustar la altura del marcador.	4
Chasis que facilite el acceso a componentes para mantenimiento y actualizaciones.	3
Chasis que permita el apilamiento seguro de múltiples unidades.	3
Chasis sin bordes afilados y con formas redondeadas para hacerlo más amigable y seguro al tacto.	3
Soporte del marcador que mantenga una posición estable y constante durante el proceso de dibujo.	3

Después de obtener los resultados de la encuesta, se agruparon las necesidades identificadas en función de su relación entre sí. A partir de estas agrupaciones, se determinaron las necesidades primarias del proyecto, lo que permitió identificar las características esenciales que guiarán el desarrollo. Este enfoque ayudó a estructurar el proyecto de manera coherente

#### **El SD tiene un chasis robusto**

- Materiales adecuados que ofrezcan una alta resistencia y durabilidad.
- Componentes del robot (motores, baterías, sensores) firmemente fijados al chasis.

#### **El SD se transporta con facilidad**

- Chasis que permita el apilamiento seguro de múltiples unidades.
- Chasis sin bordes afilados y con formas redondeadas para hacerlo más amigable y seguro al tacto.

#### **El SD es estable y con un rendimiento óptimo**

- Chasis y/o control que minimice el riesgo de volcaduras durante el movimiento.
- Chasis y/o control para mejorar la estabilidad y el rendimiento del Atta-Bot STEM.

### **El SD permite un fácil mantenimiento**

- Chasis que facilite el acceso a componentes para mantenimiento.
- Chasis modular que permita una fácil modificación y actualización de componentes.

### **El SD posee una herramienta de fácil uso para el usuario**

- Herramienta que sea intuitiva y sencilla de utilizar.
- Fácil montaje y desmontaje del marcador en el actuador.

### **El SD tiene una herramienta robusta**

- Soporte y mecanismo adecuado para la herramienta a incorporar, asegurando su correcta operación y funcionalidad en tareas de manipulación.
- Mecanismo para ajustar la altura del marcador.
- Soporte del marcador que mantenga una posición estable y constante durante el proceso de dibujo.
- Función de control en el código que permita la operación de la herramienta a diseñar.

### **El SD es preciso en sus movimientos**

- Movimientos del robot precisos, tanto en giros como en avances o retrocesos.

Esta etapa permite establecer un lenguaje común entre el cliente y los diseñadores, alineando las expectativas sobre lo que se busca como solución final al problema. En los resultados de esta, se identificaron un total de 7 necesidades primarias y 15 secundarias. Además, ninguna necesidad fue clasificada con un nivel de importancia de 1 o 2, según lo expresado por el cliente en la encuesta. Esto indica que todas las necesidades presentadas en la tabla 4 son críticas, deseables o negociables, sin que haya ninguna considerada indeseable o irrelevante.

### **3.3 Establecimiento de las especificaciones**

Después de identificar, organizar y priorizar las necesidades del sistema, el siguiente paso es definir las especificaciones. Esto se hace estableciendo métricas y objetivos que guiarán el diseño, convirtiendo las necesidades del cliente en términos técnicos.

A continuación, se presenta la matriz de necesidades. En la figura 2, se observan 12 métricas en total, cada una relacionada con una o varias necesidades principales. La matriz indica que todas las necesidades están cubiertas por al menos una métrica.

		Métrica														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
		Nivel de resistencia del chasis ante esfuerzos o impactos														
		Modulo elástico de los materiales del chasis														
		Desplazamiento de los componentes al tacto														
		Cantidad de componentes expuestos al usuario en el robot														
		Cantidad de unidades que se puede apilar entre sí														
		Radios de las curvaturas en las esquinas														
		Porcentaje de volcadura del robot al frenar														
		Tiempo de desarmado del chasis para mantenimiento														
		Tiempo que le toma al usuario colocar y/o retirar el marcador														
		Vida útil del sujetador o ajuste del marcador														
		Desplazamiento del marcador durante el movimiento del robot														
		Porcentaje de error en los movimientos del robot														
Necesidad																
1	El SD tiene un chasis modular y robusto	•	•	•	•											
2	El SD se transporta con facilidad					•	•									
3	El SD es estable y con un rendimiento optimo							•								
4	El SD permite un fácil mantenimiento								•							
5	El SD posee una herramienta de fácil uso para el usuario									•						
6	El SD tiene una herramienta robusta										•	•				
7	El SD es preciso en sus movimientos															•

Figura 2. Matriz de necesidades

Posteriormente, se definieron los valores marginales e ideales para cada métrica, basados en estimaciones e investigaciones realizadas según lo que el cliente mencionó en las entrevistas. Los resultados de este proceso se encuentran en la tabla 6. Estos valores establecen especificaciones medibles que se utilizarán para verificar el cumplimiento de las necesidades en las fases posteriores del diseño y se explica su elección en los próximos párrafos.

- **Selección de valores ideales y marginales para la métrica sobre el nivel de resistencia del chasis ante esfuerzos o impactos**

Como parte del proceso de selección de los valores ideales y marginales para la métrica de resistencia del chasis ante esfuerzos o impactos, se optó por aplicar la normativa IK. La normativa es un estándar internacional que mide el grado de protección de los envoltentes de equipos eléctricos contra impactos mecánicos externos. Esta clasificación, conocida como IK Rating (norma UNE-EN 62262), define la capacidad de una carcasa o chasis para resistir golpes o impactos, clasificándolos en una escala que va desde IK00 (sin protección) hasta IK10 (máxima protección). En la tabla 5. se presenta la escala IK las características relacionadas.

Tabla 5. Escala de clasificación de la normativa IK. [26]

<b>Clasificación IK</b>	<b>Significado o interpretación del nivel IK</b>
IK01	Protegido contra una fuerza de 0,14 julios.
IK02	Protegido contra una fuerza de 0,2 julios.
IK03	Protegido contra una fuerza de 0,35 julios.
IK04	Protegido contra una fuerza de 0,5 julios.
IK05	Protegido contra una fuerza de 0,7 julios.
IK06	Protegido contra una fuerza de 1 julio.
IK07	Protegido contra una fuerza de 2 julios.
IK08	Protegido contra una fuerza de 5 julios.
IK09	Protegido contra una fuerza de 10 julios.
IK10	Protegido contra una fuerza de 20 julios.

Como valor ideal y marginal se busca la normativa IK08, donde en base a los cálculos de las Ec. 1 y 2, en promedio se tendría un impacto de 3.09 julios si el robot cayera de una altura de 90 cm. Esto tomando como partida el peso actual del Atta-Bot STEM (350g).

$$Energía al impactar esperada = altura * peso * gravedad \quad (1)$$

$$Energía al impactar esperada = 0.9 \text{ m} * 0.45 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3.09 \text{ Julios} \quad (2)$$

- **Selección de valores ideales y marginales para la métrica sobre el módulo elástico de los materiales del chasis**

La elección de un material con un módulo de elasticidad debe ser uno que permita que el chasis tenga suficiente flexibilidad para absorber impactos y resistir pequeñas deformaciones sin comprometer su estructura. En el entorno educativo, donde el robot puede ser manejado por usuarios inexpertos o sometido a caídas y golpes, esta capacidad de absorber energía sin fracturarse es fundamental.

Además, un módulo de elasticidad moderado asegura que el chasis mantenga una rigidez suficiente para proporcionar estabilidad durante el movimiento, sin agregar un peso excesivo que dificulte la eficiencia de los motores o sobrecargue otros componentes. Este balance entre rigidez y flexibilidad es ideal para proyectos donde se requiere una estructura ligera pero resistente, adecuada para soportar las demandas típicas de un robot en entornos de aprendizaje.

Una vez teniendo en cuenta esto, los polímeros suelen tener un módulo de elasticidad que oscila entre los 2 y 3.5 GPa [27] dependiendo del tipo específico de material. Este rango es significativamente inferior al de materiales como los metales, pero es precisamente esta característica la que los hace adecuados para aplicaciones como el chasis de un robot educativo. Además, que su uso ha sido validado en numerosos proyectos similares [28], lo que refuerza su idoneidad y confiabilidad en aplicaciones dentro de este campo.

- **Selección de valor ideal y marginal para la métrica sobre el desplazamiento de los componentes al tacto**

Se seleccionó un valor ideal de menor o igual a 0.5 mm para la métrica de desplazamiento de los componentes al tacto porque representa una tolerancia suficientemente ajustada para garantizar la estabilidad estructural del sistema. Este nivel de desplazamiento asegura que los componentes permanezcan firmemente en su lugar durante su uso, evitando vibraciones indeseadas o posibles desajustes que puedan afectar el rendimiento o la durabilidad del sistema.

Por otro lado, se definió un valor marginal de 1 mm como un límite máximo aceptable antes de que el desplazamiento pueda comenzar a afectar negativamente la funcionalidad o la seguridad del sistema. Este valor marginal permite cierta flexibilidad en los procesos de fabricación y ensamblaje sin llegar a comprometer de manera significativa la estabilidad o el rendimiento del sistema.

Aunque un desplazamiento de 1 mm es más notorio, sigue siendo tolerable en situaciones donde las fuerzas aplicadas no son críticas o donde los componentes tienen margen para moverse sin causar daños.

- **Selección de valor ideal y marginal para la métrica sobre cantidad de componentes expuestos al usuario en el robot.**

En la primera versión del Atta-Bot STEM, se observó que 7 de los 10 componentes estaban expuestos, lo que representaba un 70% de los componentes vulnerables al ambiente externo, como posibles impactos, polvo o contacto directo. Esta exposición puede comprometer la durabilidad y fiabilidad del robot, además de influir negativamente en su desempeño en entornos más exigentes.

Por esta razón, para la iteración actual del diseño, se ha establecido el objetivo de mejorar este aspecto reduciendo la exposición de los componentes. Se espera alcanzar un valor marginal de 4 componentes. Este valor marginal es un límite aceptable que permitiría mejorar considerablemente la protección del robot respecto a la versión anterior, ofreciendo un mayor nivel de seguridad sin exceder las capacidades de diseño o fabricación en esta fase.

Por otro lado, el valor ideal que se busca es de menor o igual a 2. Este objetivo reflejaría un diseño más robusto y refinado, donde casi todos los componentes estén protegidos dentro del cuerpo del robot. Lograr este nivel ideal de protección reduciría aún más los riesgos asociados a daños externos.

- **Selección de valor ideal y marginal para la métrica sobre radios de las curvaturas en las esquinas.**

Para la métrica de curvatura en las esquinas del diseño, se ha determinado que un valor ideal de al menos 10 grados y un marginal de 5 grados es apropiado debido a varias consideraciones tanto de seguridad como de funcionalidad.

En la primera versión del Atta-Bot STEM, la estructura está fabricada completamente en acrílico. Aunque este material ofrece una ligera protección al usuario mediante bordes redondeados que previenen picos peligrosos, la forma en que las piezas se ensamblan deja agujeros o espacios entre las esquinas, figura 3. Estos agujeros no solo exponen componentes internos importantes, sino que también aumentan el riesgo de daños por el ingreso de partículas, polvo, o incluso impactos en

áreas sensibles del robot. Además, estos espacios reducen la rigidez y resistencia estructural en esas áreas.



Figura 3. Primera versión del Atta-Bot STEM.

- **Selección de valor ideal y marginal para la métrica sobre volcadura del robot al frenar**

En la versión actual del robot, se ha observado que, al frenar este tiende a inclinarse hacia adelante casi el 100% de las veces durante las pruebas. Este comportamiento indica una falta de estabilidad en la distribución del peso o en el diseño del sistema de frenado, lo que genera un vuelco o inclinación hacia adelante al detenerse. Debido a esta inestabilidad, es esencial reducir significativamente este porcentaje en la siguiente iteración del robot, estableciendo un valor ideal de 0%, donde el robot no se vuelque al frenar, y un valor marginal que permita un 10% de inestabilidad aceptable en situaciones controladas.

- **Selección de valor ideal y marginal para la métrica sobre tiempo de desarmado del chasis para mantenimiento.**

Se busca que el chasis del robot esté diseñado de tal manera que permita un mantenimiento sencillo y eficiente. En un entorno educativo, donde el aprendizaje práctico es fundamental, es probable que surjan inconvenientes durante las lecciones. Por lo tanto, es crucial que el proceso de desensamblaje del chasis sea rápido y sin complicaciones.

Este enfoque permitirá que, en caso de que se presente un problema técnico, los educadores o estudiantes puedan acceder a los componentes internos sin necesidad de herramientas especializadas o de un tiempo prolongado. Al facilitar un mantenimiento ágil, se minimizará el tiempo de inactividad del robot, permitiendo que el proceso de solución de problemas se realice de manera eficiente. Por lo cual, se propone que el valor ideal para desmontar el chasis sea de un tiempo menor o igual a 5 minutos y como marginal se tomara un tiempo de desmontaje igual a 10 minutos.

- **Selección de valor ideal y marginal para la métrica sobre tiempo que le toma al usuario colocar y/o retirar el marcador.**

La selección de valores se ha formado con el objetivo de minimizar este proceso, ya que se busca que el tiempo de configuración del robot sea lo más reducido posible, maximizando su utilidad en el aula. Se elije un valor ideal de 30 segundos y un tiempo igual a 60 segundos que este se considera como marginal.

- **Selección de valor ideal y marginal para la métrica sobre vida útil del sujetador o ajuste del marcador.**

Los valores ideal y marginal para la vida útil de colocación y retiro del marcador se seleccionaron considerando el contexto de un docente del MEP (Ministerio de Educación Pública) que imparte 28 lecciones por semana [29]. Suponiendo que, durante cada lección, el marcador se coloca y desmonta al menos dos veces, esto implica un total de 112 manipulaciones por semana.

Además, se busca que el sujetador del marcador sea lo suficientemente duradero para que necesite ser cambiado solo dos veces al año, lo que también contribuye a reducir el tiempo dedicado al mantenimiento del robot. Por lo cual, el valor ideal sería 675 cambios aproximadamente y un valor marginal sería 340 cambios, lo cual implicaría que se tendría que hacer un cambio del sujetador cada 3 meses.

- **Selección de valor ideal y marginal para la métrica sobre desplazamiento del marcador durante el movimiento del robot.**

La métrica sobre el desplazamiento de la punta del marcador con respecto a su centro tiene un valor ideal de 1 mm, asegurando alta precisión en los trazos. El valor marginal es de 2 mm, permitiendo un rango de desplazamiento aceptable para su funcionamiento adecuado en el aula y así no agregar errores en la precisión de los movimientos del robot. Además, diseñar una herramienta con estabilidad inherente facilita su manipulación por usuarios que están en desarrollo de sus habilidades motrices.

- **Selección de valor ideal y marginal para la métrica sobre porcentaje de error en los movimientos del robot.**

La selección del porcentaje de error en los movimientos del robot se basó en los resultados obtenidos en la investigación de la primera versión del Atta-Bot STEM. El valor ideal se estableció como un promedio de error menor o igual al 2%, garantizando una alta precisión en los desplazamientos. Cualquier valor superior al 4% se considera marginal, indicando un rango de error mayor pero aún aceptable dentro de las pruebas realizadas. Estos valores permiten mejorar el rendimiento del robot en la nueva versión, basándose en datos previos para asegurar una mayor exactitud en los movimientos.

Tabla 6. Especificaciones objetivo.

Número de métrica	Número de necesidad	Métrica	Imp	Unidades	Valor Marginal	Valor ideal
1	1	Nivel de resistencia del chasis ante esfuerzos o impactos	5	Norma	IK08	IK08
2	1	Modulo elástico de los materiales del chasis	5	Gpa	< 2    >3.45	2 - 3.45
3	1	Desplazamiento de los componentes al tacto	5	mm	1	<= 0.5
4	1	Cantidad de componentes expuestos al usuario en el robot	4	cant.	4	<= 2
5	2	Cantidad de unidades que se puede apilar entre sí	3	cant.	2	>= 3
6	2	Radios de las curvaturas en las esquinas	3	°	5	10
7	3	Porcentaje de volcadura del robot al frenar	5	-	10	0
8	4	Tiempo de desarmado del chasis para mantenimiento	3	min	10	<= 5
9	5	Tiempo que le toma al usuario colocar y/o retirar el marcador	4	seg	60	<= 30
10	6	Vida útil del sujetador o ajuste del marcador	5	Puestas	340	675
11	6	Desplazamiento del marcador durante el movimiento del robot	3	mm	2	1
12	7	Porcentaje de error en los movimientos del robot	5	-	4	2

### 3.4 Exploración y generación de conceptos.

En la etapa de exploración y generación de ideas, es esencial dividir el problema principal en subproblemas más pequeños y manejables. Este enfoque, llamado "desglose del problema", facilita el análisis y resolución de cada subproblema de manera individual, aplicando las técnicas más adecuadas. Como resultado, se generaron los diagramas mostrados en las figuras 4 y 5.

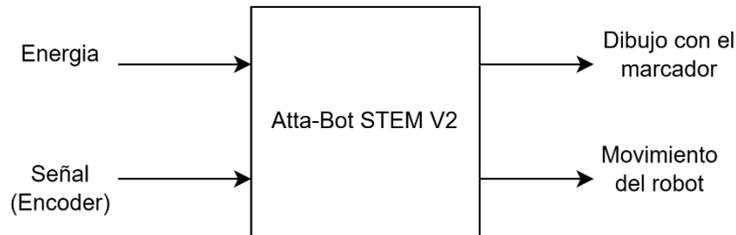


Figura 4. Diagrama de caja negra general

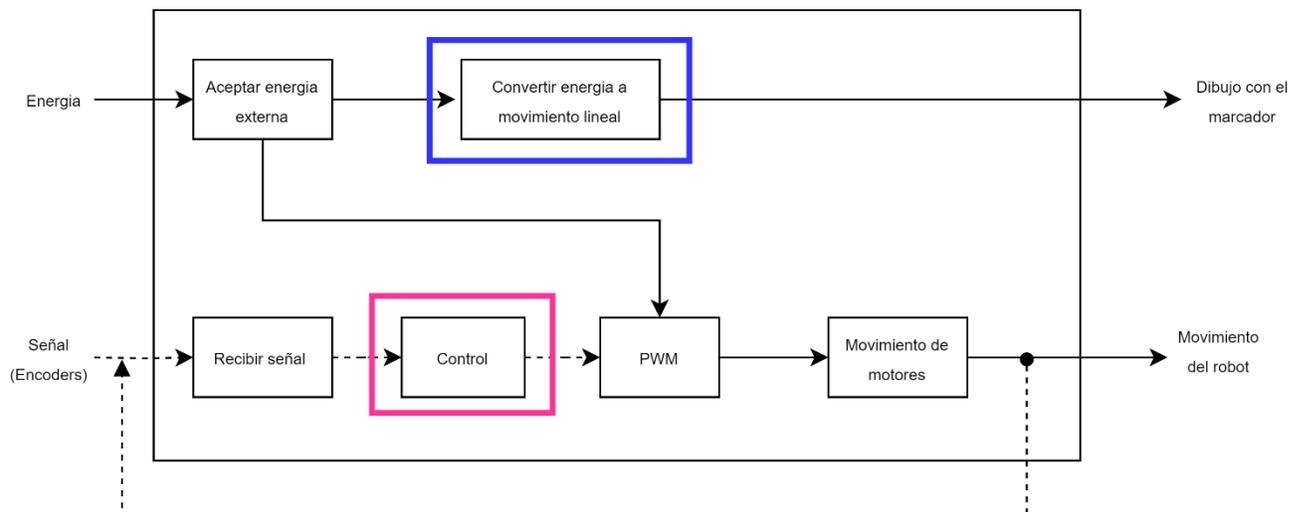


Figura 5. Descomposición funcional

A través de la descomposición funcional, se identificaron dos conceptos clave. El primero es el control de los motores, que permite regular la precisión del movimiento general del robot. El segundo es la conversión de energía a movimiento lineal, específicamente para desplazar el marcador hacia arriba o hacia abajo.

Este movimiento es crucial para poner el marcador en contacto con la superficie y realizar los trazos necesarios para dibujar, permitiendo una interacción efectiva con el entorno. De igual forma, aunque no se represente en la figura 5, se tiene también los conceptos del material para el chasis, método de manufactura del chasis, el estilo de la estructura principal del chasis y el sujetador del marcador.

Luego de este seccionamiento, se lleva a cabo una búsqueda de conceptos para cada uno de los bloques funcionales definidos previamente. Para ello, se consultaron fuentes académicas y literatura especializada (búsqueda externa). Adicionalmente, se propusieron nuevas ideas basadas en el conocimiento y la experiencia previa (búsqueda interna), asegurando un enfoque equilibrado y fundamentado para el desarrollo del diseño.

- **Desarrollo del Concepto: Convertir energía a movimiento lineal.**

Para abordar esta necesidad, se han propuesto diversas soluciones tecnológicas, cada una con sus características y beneficios específicos. Entre estas soluciones se encuentran el micro actuador lineal, el micromotor a paso, el servomotor lineal, el solenoide lineal y un servomotor con una adaptación para una cremallera.

Cada uno de estos dispositivos está diseñado para transformar energía eléctrica en movimiento lineal efectivo, esto desde una investigación interna, no obstante, se confronta con investigación externa. A continuación, se detalla cada actuador.

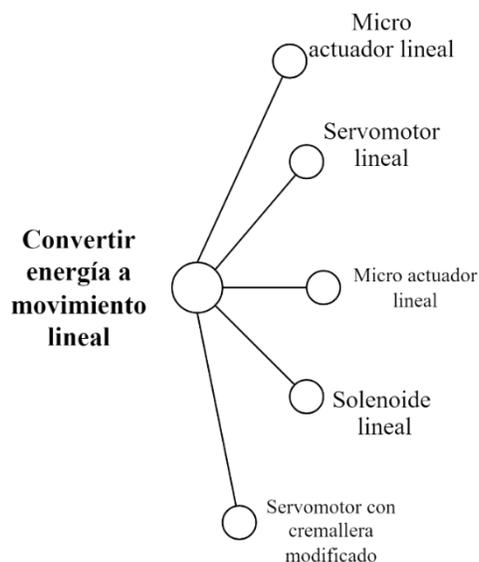


Figura 6. Árbol de clasificación de conceptos de convertir energía a movimiento lineal.

- **Micro actuador lineal:** Opción que ofrece una alta precisión en el control del movimiento, lo que lo convierte en una excelente elección para aplicaciones que requieren exactitud. Su diseño compacto y cerrado facilita su integración en proyectos electrónicos, ya que no requiere ajustes adicionales. En términos de consumo energético, estos actuadores suelen ser eficientes, aunque el consumo puede aumentar con cargas más pesadas. A nivel de costos, es una opción moderada a alta, A medida que su tamaño disminuye, su costo incrementa. [30]



Figura 7. Micro actuador lineal [31].

- **Micromotor a pasos (18°):** ofrece precisión en el control del movimiento con incrementos de 18 grados por paso, ideal para aplicaciones que requieren exactitud moderada. Su diseño compacto facilita su integración en proyectos electrónicos sin necesidad de ajustes complejos. Es eficiente en consumo energético. Es una opción accesible para proyectos que buscan un equilibrio entre precisión y costo. [32]



Figura 8. Micromotor a pasos [32].

- **Servomotor lineal:** Destaca por su combinación de alta precisión y velocidad, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que necesitan movimientos rápidos y exactos. Este tipo de actuador es muy fácil de integrar en proyectos, ya que está diseñado para funcionar sin modificaciones adicionales. En cuanto al consumo energético, los servomotores son conocidos por ser relativamente eficientes, pero pueden requerir más energía en movimientos de alta velocidad o bajo carga máxima. A nivel de costos, se ubica en un rango bajo, [33]



Figura 9. Servomotor lineal [33].

- **Solenoid lineal:** Es una de las opciones más compactas y económicas disponibles. Su principal ventaja es la rapidez con la que realiza desplazamientos cortos, lo que lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere velocidad en espacios reducidos. Sin embargo, su precisión es considerablemente baja, y su recorrido está limitado, lo que no lo hace adecuado para movimientos largos ni para situaciones que demanden exactitud. Además, la fuerza que puede ejercer es baja, restringiendo su uso a aplicaciones de bajo requerimiento de carga. En cuanto a su consumo energético, los solenoides tienden a consumir más energía en períodos prolongados de activación, ya que requieren corriente continua para mantenerse en funcionamiento. [34]



Figura 10. Solenoide lineal [34].

- **Servomotor con cremallera modificado:** Esta es una solución personalizable, donde se puede diseñar un sistema de engranajes para convertir el movimiento rotacional en lineal. Este tipo de configuración puede proporcionar una buena capacidad de carga, dependiendo del diseño del sistema mecánico. Es una opción económica o de costo moderado, especialmente porque aprovecha la base de un servomotor estándar. Sin embargo, la precisión puede ser moderada y su implementación requiere diseño mecánico adicional, lo que puede añadir complejidad al proyecto. En términos de consumo energético, este sistema puede ser eficiente, aunque el consumo dependerá en gran medida de la configuración del engranaje y de la carga que se esté moviendo.

- **Desarrollo del concepto: Control**

La elección del controlador adecuado para un motor DC es un proceso que depende de las características del sistema y de los requisitos específicos de la aplicación. Cada tipo de controlador a mencionar ofrece un enfoque diferente, y su análisis permite comprender mejor cómo optimizar el rendimiento del sistema de control. Al considerar aspectos como la complejidad del cálculo, la respuesta del sistema y las condiciones operativas, se podrá seleccionar la estrategia más apropiada para satisfacer las necesidades del prototipo en cuestión.

En este contexto, se investigan diversos controladores, entre los cuales se encuentran el PID (Proporcional-Integral-Derivativo), PI (Proporcional-Integral), I-PD (Integral-Proporcional-Derivativo) y los controladores de realimentación de estados integral. Cada uno de estos controladores tiene características particulares que los hacen adecuados para diversas aplicaciones y que se ahondarán a continuación. No se omite destacar que de igual forma que en el concepto anterior, se proponen estas soluciones en base a experiencia previa en el tema, no obstante, se corrobora con la investigación a mencionar.

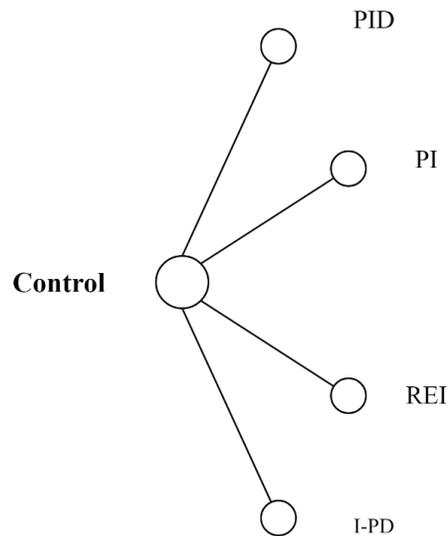


Figura 11. Árbol de clasificación de conceptos de control.

- **PID** (Proporcional-Integral-Derivativo): Este controlador ajusta su salida en función de tres componentes clave:
  - Proporcional: error actual. [35]
  - Integral, Acumulación de errores pasados para eliminar cualquier offset en estado estacionario. [35]
  - Derivativa: Anticipa el comportamiento futuro del error al considerar su tasa de cambio. [35]

Sin embargo, su consumo computacional puede ser mayor debido a la necesidad de calcular los tres términos (P, I y D) en cada ciclo de control, lo que implica operaciones matemáticas adicionales y almacenamiento de estado.

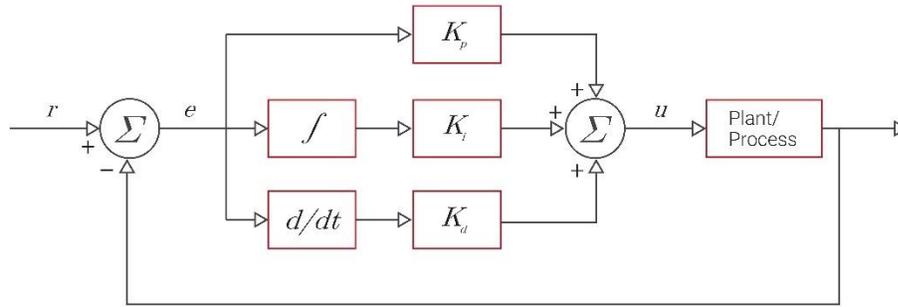


Figura 12. Controlador PID [36].

- **PI** (Proporcional-Integral): Es un control más sencillo al omitir la acción derivativa. Esto significa que su salida se basa únicamente en el error actual y el error acumulado a lo largo del tiempo. Esta configuración es particularmente útil en sistemas donde es esencial eliminar el error en estado estacionario, pero donde las oscilaciones no son un problema crítico. Dado que solo requiere calcular dos términos, el consumo computacional de un controlador PI es generalmente menor que el de un PID, lo que lo hace adecuado para sistemas más simples o aquellos con recursos limitados. [35]

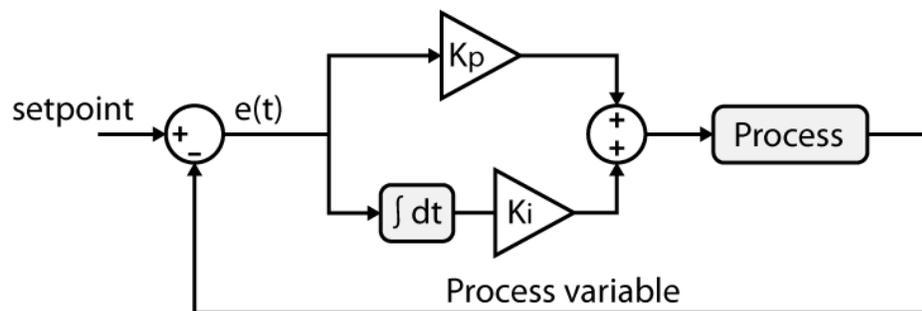


Figura 13. Controlador PI [37].

- **Realimentación de Estado Integral** se basa en la realimentación de las variables de estado del sistema, integrando estos estados para calcular la acción de control. Este enfoque es especialmente potente en sistemas más complejos y multivariables, donde se busca un control robusto y preciso. Sin embargo, su implementación puede ser más intensiva computacionalmente, ya que requiere un modelo del sistema y puede implicar cálculos más sofisticados para gestionar múltiples estados, lo que incrementa el consumo de recursos. [38]

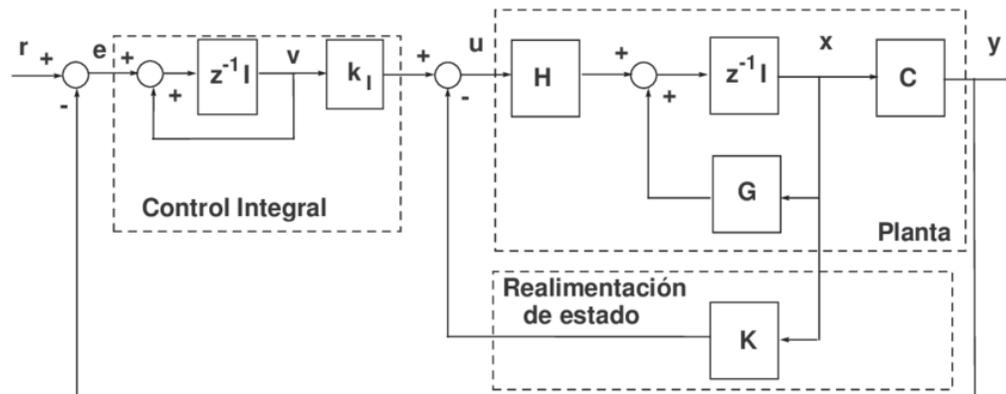


Figura 14. Controlador por REI [39].

- **I-PD** (Integral-Proporcional-Derivativo): combina la acción integral con la proporcional y la derivativa. La parte integral trabaja para eliminar el error acumulado, mientras que la parte proporcional y la derivativa ayudan a responder de manera efectiva a cambios en el error y a amortiguar oscilaciones. Aunque este controlador es eficaz en aplicaciones donde se requiere tanto una rápida respuesta como la eliminación de offset, su consumo computacional es un poco mayor al del PID, ya que también necesita calcular múltiples términos, aunque con un enfoque ligeramente diferente.

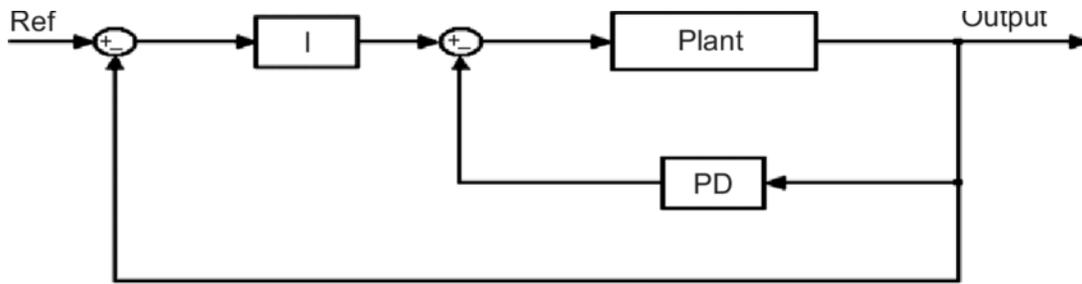


Figura 15. Controlador I-PD [40].

- **Desarrollo del concepto: Estilo de la estructura principal del chasis.**

En el diseño de un robot educativo, la estructura principal del chasis juega un papel fundamental en su funcionalidad y rendimiento. Teniendo en cuenta las necesidades establecidas, se busca crear un chasis que sea modular y ligero, lo que facilitará su ensamblaje y mantenimiento.

Al mismo tiempo, se ha optado por buscar que la estructura este compuesta de pocas piezas. Esta decisión no solo contribuye a reducir el peso total del robot, lo que mejora su movilidad y facilidad de manejo, sino que también simplifica el proceso de ensamblaje, haciendo que el robot sea más accesible para los usuarios poco capacitados.

Una vez entiendo esto, en una búsqueda externa se halló el robot Beebot [41]. El chasis del Bee-Bot es compacto, ligero y está fabricado con plástico. Su estructura alberga botones de dirección y control en la superficie, permitiendo una programación directa. Tiene una forma redondeada, que facilita su movimiento en superficies planas, y una cubierta sólida que protege los componentes internos, asegurando resistencia frente a impactos frecuentes en entornos escolares.



Figura 16. Robot Educativo Beebot [41].

Por otra parte, se tiene el LEGO Mindstorms [42]. Esta describe un juguete de robot educativo que es modular y está compuesto por piezas de LEGO interconectables. Su estructura permite configuraciones personalizables, desde diseños básicos hasta estructuras complejas. Las piezas modulares permiten adaptar el chasis a diferentes formas, lo que facilita su uso en proyectos variados. Además, es compatible con sensores y actuadores externos, integrados mediante puntos de conexión distribuidos en el chasis, lo que soporta una amplia variedad de configuraciones robóticas.



Figura 17. Juguete – Robot Educativo LEGO Mindstorm [42].

La investigación destaca que no existe un estilo de chasis superior a otro; sin embargo, se identifican características comunes que ofrecen diversas ventajas. Por ejemplo, el uso de chasis de plástico hueco facilita la integración de componentes internos y reduce el peso total. Aunque sus formas varían, ambos diseños presentan esquinas redondeadas, lo cual minimiza puntos críticos susceptibles a daños o posibles riesgos de seguridad. Además, la curva del chasis proporciona una protección adicional al ser seguro al tacto, lo que lo hace adecuado para entornos educativos.

Otra característica física notable es la superficie del chasis de ambos robots, que permite la fácil aplicación de accesorios o etiquetas visuales. En el caso de Bee-Bot, su superficie lisa y amplia es adecuada para personalizar con elementos gráficos, facilitando actividades educativas que requieran identificación visual o interacción directa. Por otro lado, el chasis modular de LEGO Mindstorms incorpora múltiples puntos de conexión que permiten la adición de componentes

externos o estructuras adicionales, proporcionando versatilidad para adaptar el robot a diversas tareas y proyectos sin modificar su base.

Se destaca que esta búsqueda externa ofrece una orientación sobre el desarrollo de chasis en robótica educativa, proporcionando un punto de referencia sobre características comunes y ventajas observadas en diseños como los de Bee-Bot y LEGO Mindstorms. Sin embargo, estos conceptos no deben interpretarse como soluciones definitivas para problemas específicos de diseño o como propuestas cerradas; más bien, sirven como una base para orientar el desarrollo y permitir una comprensión más amplia de las opciones en este ámbito y para dar satisfacción a las peticiones del cliente.

- **Desarrollo de los conceptos: material para el chasis y método de manufactura del chasis.**

Al seleccionar un material para fabricar, no solo se deben considerar sus propiedades físicas y mecánicas, sino también el método de manufactura que se empleará. El proceso de fabricación influye en la elección del material, ya que ciertos métodos son más adecuados para materiales específicos. Además, la capacidad del material para ser moldeado, cortado o procesado de manera eficiente puede afectar tanto la calidad del producto final como los costos y tiempos de producción.

Existen varios métodos para fabricar el chasis de un robot móvil utilizando diferentes materiales, cada uno con sus ventajas y aplicaciones particulares. A continuación, se detallan tres métodos: termoformado, impresión 3D y corte láser, junto con los materiales que se pueden emplear en cada uno.

- **Termoformado:** Este proceso consiste en calentar una lámina de plástico hasta que se vuelve maleable, y luego se moldea sobre una forma específica. Los materiales como ABS y PETG son adecuados para este método. Sirve para crear piezas grandes y robustas, pero tiene la desventaja de requerir moldes previos, lo que lo hace menos flexible en términos de iteraciones de diseño y además el costo de los moldes pueden llegar a ser muy altos. [43]

- **Impresión 3D:** Ofrece gran precisión y flexibilidad en la fabricación de piezas. Materiales como PLA, PETG, ABS y resina son comunes en este método, cada uno con propiedades específicas. Hay que considerar que el tiempo de manufactura dependerá de la complejidad de la pieza. Además, no hay cantidades mínimas de fabricación ni tamaños de pedido, en cambio en el termoformado sí. [43]
- **CNC:** Una máquina de control numérico por computadora (CNC) está diseñada para trabajar con materiales como el polimetilmetacrilato (PMMA), también conocido como acrílico. Se utiliza para cortar, grabar o fresar piezas con alta precisión, logrando acabados suaves y detallados en diversos productos. Sin embargo, un aspecto común en la manufactura con este material es la acumulación de polvo y virutas debido a la estática, lo cual puede afectar el acabado final de las piezas. [44]
- **Corte Láser:** Este método utiliza un láser de alta precisión para cortar y grabar materiales como PMMA (acrílico) y ABS en láminas delgadas. Es ideal para piezas planas que luego pueden ensamblarse en estructuras tridimensionales. El corte láser permite una producción rápida de piezas con bordes limpios, aunque está limitado en cuanto a formas más complejas que requieren volumen, a diferencia de la impresión 3D [45].

Ahora bien, la impresión 3D tiene algunas ventajas sobre el termoformado para la fabricación del chasis de un robot móvil. En primer lugar, ofrece mayor precisión y personalización en el diseño, lo que es crucial para crear estructuras complejas y adaptaciones específicas requeridas en un robot. Además, este método permite iterar y modificar rápidamente los diseños sin necesidad de costosos moldes, como ocurre en el termoformado, lo que facilita el ajuste continuo en la fase de desarrollo.

También, una de las ventajas más destacadas de la impresión 3D es que se adapta perfectamente a los proyectos que se distribuyen bajo licencias Creative Commons, como es el caso de este diseño. Dado que las impresoras 3D pueden ser accesibles en muchas instituciones educativas, los centros pueden crear sus propios prototipos de forma sencilla, alineándose con la visión de

incentivar el aprendizaje en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) y al mismo tiempo facilitar la propagación del diseño entre la comunidad educativa, permitiendo a los estudiantes experimentar con tecnologías avanzadas.

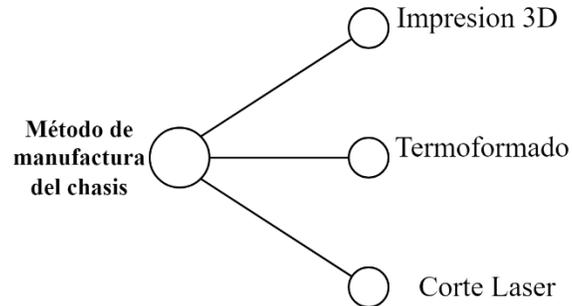


Figura 18. Árbol de clasificación de conceptos de método de manufactura del chasis.

Una vez comprendido esto, se observa que se pueden tener las siguientes soluciones para este concepto, figura 19.

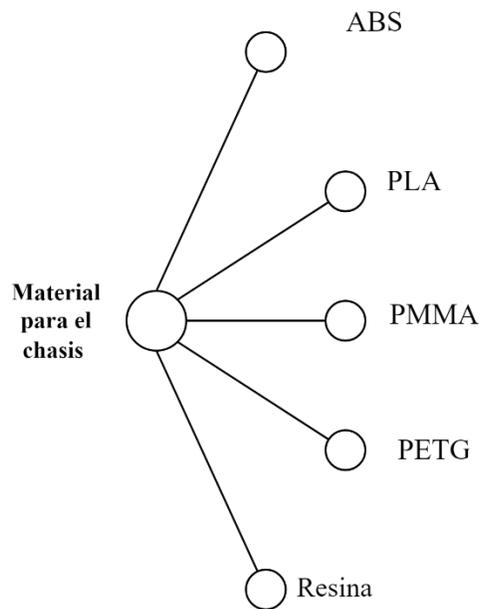


Figura 19. Árbol de clasificación de conceptos de material para el chasis.

- **PLA (Polylactic Acid):** Este es un material plástico biodegradable, derivado de recursos renovables como el almidón de maíz. Es conocido por ser amigable con el medio ambiente, ya que se degrada más fácilmente que otros plásticos bajo las condiciones adecuadas. Una ventaja importante es que durante su proceso de impresión no emite gases peligrosos, lo que elimina la necesidad de medidas de ventilación especial. Además, no produce olores desagradables, lo que lo hace ideal para entornos de trabajo seguros y cómodos. Sin embargo, a pesar de estas ventajas, el PLA es menos resistente a impactos y temperaturas altas en comparación con otros materiales, lo que lo hace más adecuado para piezas que no requieran una alta resistencia mecánica [46].
- **ABS (Acrylonitrilo Butadieno Estireno):** Es un plástico a base de petróleo que ofrece mayor durabilidad y resistencia que el PLA. Es menos frágil, por lo que es adecuado para aplicaciones donde se necesite una mayor robustez. Además, puede soportar temperaturas más elevadas, lo que lo hace ideal para piezas que estén expuestas a calor o fricción. Sin embargo, el ABS emite gases tóxicos durante la impresión, lo que requiere un sistema de ventilación adecuado para evitar riesgos a la salud. También necesita una cama caliente para adherirse correctamente a la superficie de impresión, lo que añade complejidad y costo al proceso. [46]
- **PETG (Polietileno Tereftalato Modificado con Glicol):** Este es versátil ya que combina varias ventajas. No produce olores durante la impresión y presenta un bajo nivel de contracción, lo que minimiza las deformaciones durante el enfriamiento. Su naturaleza hidrofóbica evita que absorba humedad y posee la característica de resistencia química. Además, el PETG ofrece una excelente resistencia al impacto, alta durabilidad y flexibilidad, y se imprime de manera suave y fluida. También destaca por su transparencia y brillo, lo que lo hace visualmente atractivo [46] [47].

- **PMMA:** Es un polímero acrílico que destaca por su alta resistencia mecánica, siendo uno de los termoplásticos más duros con excelente resistencia a los arañazos. Su módulo de elasticidad elevado lo hace robusto, y no se fractura fácilmente bajo tensión, lo que asegura que no se astille al romperse. También presenta una gran estabilidad térmica, soportando temperaturas extremas sin perder sus propiedades. En cuanto a su resistencia química, el PMMA es razonablemente resistente a la mayoría de las soluciones acuosas de productos químicos, aunque puede ser vulnerable a ciertos compuestos específicos. Su durabilidad frente a la exposición solar y a la radiación ultravioleta lo hace ideal para aplicaciones que requieren mantener sus características físicas en entornos exteriores [48].
- **Resina:** Es un material que permite obtener piezas con alto nivel de detalle y precisión, Las resinas se destacan por su capacidad de producir superficies suaves y acabados detallados, lo que las hace apropiadas para prototipos o piezas que requieren una alta definición. Asimismo, ofrecen una buena resistencia al calor y algunos productos químicos, dependiendo del tipo. Sin embargo, pueden presentar desventajas como la fragilidad o la dificultad para manejar en algunos casos. Al mismo tiempo, requieren impresoras especializadas para su uso y pueden ser más caras en comparación con otros materiales como PLA o PETG. A pesar de esto, la resina sigue siendo una excelente opción para aplicaciones donde la estética y el detalle son críticos [47].

No se omite mencionar que los materiales sugeridos para este diseño se eligen para cumplir con los valores ideales establecidos en la métrica. Por ejemplo, todos los materiales seleccionados son polímeros, y como se muestra en el cuadro de Ashby en la figura 20, están dentro del rango de módulo elástico requerido según las especificaciones.

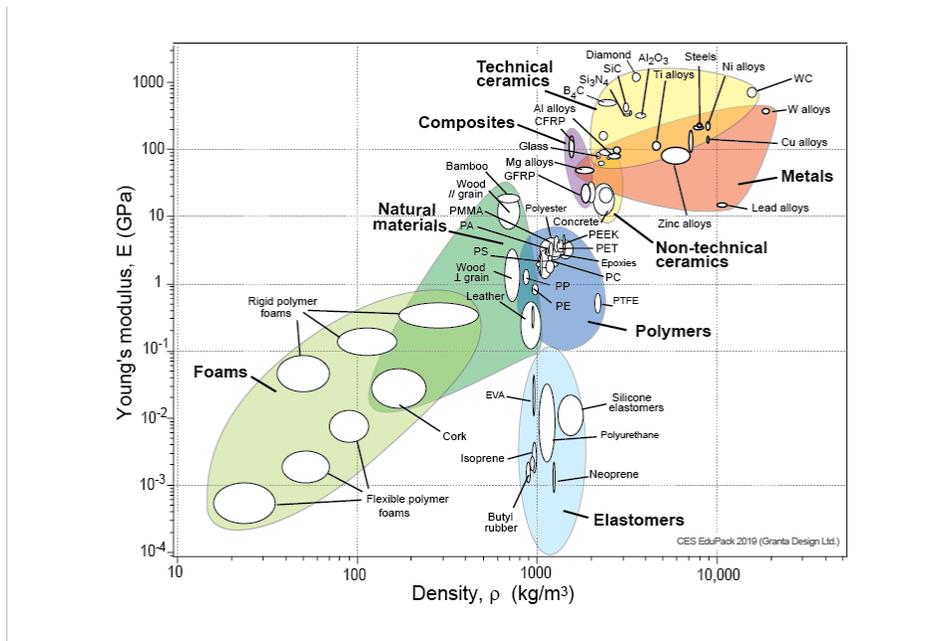


Figura 20. Cuadro Ashby de modulo elástico vs densidad del material [49].

- **Desarrollo del concepto: sujetador del marcador**

En el proceso de diseñar un sujetador para el marcador, se llevó a cabo una búsqueda externa para identificar soluciones que optimicen su funcionalidad y eficacia. Esta investigación ha permitido recopilar diferentes alternativas que se adaptan a las necesidades específicas del proyecto.

El objetivo principal del sujetador es garantizar una sujeción firme y confiable del marcador, permitiendo un control preciso durante el proceso de dibujo. Al considerar las opciones disponibles, se buscaron enfoques que faciliten la manipulación y ajuste del marcador, asegurando que se mantenga en la posición correcta mientras se realizan trazos.

En la búsqueda se obtuvieron los siguientes resultados:

- Prensa para marcador:



Figura 21. Clip/Prensa para marcador [50].

- Mecanismo adaptador de lápices para compás:



Figura 22. Adaptador para lápiz para compás [51].

- Sujetador metálico en base a resorte, autoadaptable:



Figura 23. Sujetador metálico para lapicero [52].

En consecuencia, a partir de esta investigación externa se genere el siguiente árbol de soluciones, figura 24:

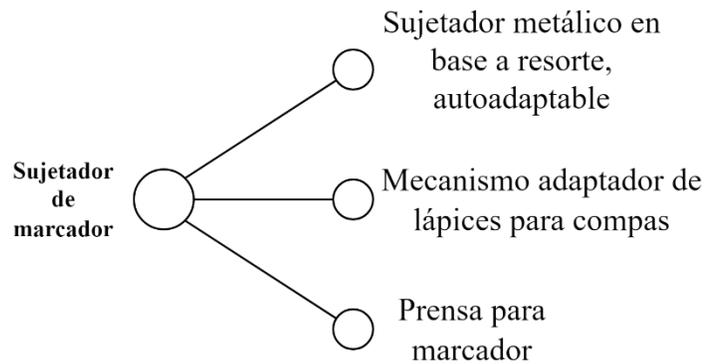


Figura 24. Árbol de clasificación de conceptos de sujetador del marcador.

### 3.5 Combinación, filtrado y evaluación de conceptos

Luego del desarrollo de conceptos se genera la tabla de combinación de estos. La cual incluye aquellos elementos que se han identificado como los más relevantes de cada uno de los árboles de clasificación previamente desarrollados. Estas combinaciones destacan las soluciones candidatas para el diseño final del robot educativo y se elaboraron con la finalidad de considerar todas las opciones posibles. En total se generaron 12 combinaciones, tablas 7 y 8.

Se destaca que se busca generar combinaciones en dos secciones: una enfocada en electrónica/control y otra en mecánica/manufactura. En la primera, se consideran combinaciones que abordan de manera específica la conversión de energía a movimiento lineal, el sujetador del marcador y el control de los motores DC. Por otro lado, la segunda se centra en los conceptos relacionados con el chasis, como el método de manufactura y el material con el que se fabricará el prototipo.

Tabla 7. Combinación de conceptos para electrónica y control.

Combinación	Controlador		Actuador		Sujetador	
	PID	PI	Servomotor Lineal	Servomotor con adaptación para cremallera	Prensa para marcador	Mecanismo adaptador de lápices para compás
A	x		x		x	
B	x		x			x
C	x			x	x	
D	x			x		x
E		x	x		x	
F		x	x			x
G		x		x	x	
H		x		x		x

Tabla 8. Combinación de conceptos para mecánica y manufactura.

Combinación	Material		Método de manufactura			
	PLA	PETG	Estructura principal		Estructura interior	
			Termoformado	Impresión 3D	CNC	Corte Laser
A	x		x			x
B	x		x		x	
C	x			x		x
D	x			x	x	
E		x	x			x
F		x	x		x	
G		x		x		x
H		x		x	x	

Teniendo ya en cuenta las combinaciones, se debe definir cuál es la adecuada para su desarrollo, lo que deriva en la selección del concepto. Esto implica un proceso para evaluar distintas ideas en relación con las necesidades preestablecidas. La metodología se divide en dos fases: la primera es el filtrado de conceptos y la segunda es la evaluación de estos. Ambas fases se apoyan en una matriz de decisiones que se utiliza para filtrar, clasificar las combinaciones y finalmente escoger el concepto más adecuado.

En las tablas 9 y 10 se presentan las matrices generadas para filtrar los conceptos identificados en la etapa anterior para ambas subdivisiones del problema.

Tabla 9. Matriz de selección de conceptos para el proceso enfocado en electrónica y control.

Criterios de seleccion	Conceptos							
	A (Referencia)	B	C	D	E	F	G	H
El SD tiene una herramienta robusta	0	0	+	+	0	0	+	+
El SD es preciso en sus movimientos	0	0	0	0	+	+	+	+
El SD posee una herramienta de fácil uso para el usuario	0	-	0	-	0	-	0	-
El SD es estable y con un rendimiento optimo	0	0	0	0	+	+	+	+
Suma +	0	0	1	1	2	2	3	3
Suma 0	4	3	3	2	2	1	1	0
Suma -	0	1	0	1	0	1	0	1
Evaluacion neta	0	-1	1	0	2	1	3	2
Lugar	4	5	3	4	2	3	1	2
¿Continuar?	No	No	No	No	Si	No	Si	Si

Tabla 10. Matriz de selección de conceptos para el proceso enfocado en mecánica y manufactura.

Criterios de seleccion	Conceptos							
	A (Referencia)	B	C	D	E	F	G	H
El SD tiene un chasis modular y robusto	0	-	+	0	+	-	+	0
El SD se transporta con facilidad	0	0	0	0	+	+	+	+
El SD permite un fácil mantenimiento	0	-	0	0	+	+	+	+
Suma +	0	0	1	0	3	2	3	2
Suma 0	4	1	2	3	0	0	0	1
Suma -	0	2	0	0	0	1	0	0
Evaluacion neta	0	-2	1	0	3	1	3	2
Lugar	4	5	3	4	1	3	1	2
¿Continuar?	No	No	No	No	Si	No	Si	Si

A través de este proceso se obtiene una primera selección de los conceptos con mayor potencial para convertirse en la solución final. Continuando con el procedimiento descrito, se lleva a cabo la evaluación, considerando diversos criterios de selección, pesos relativos y una escala de puntaje del 1 al 5. Los resultados de esta fase se presentan en las tablas 11 y 12.

Tabla 11. Matriz de evaluación de conceptos para el proceso enfocado en electrónica y control.

Criterios de seleccion	Conceptos						
	Peso	E		G		H	
		Clasificación	Evaluación Ponderada	Clasificación	Evaluación Ponderada	Clasificación	Evaluación Ponderada
El SD tiene una herramienta robusta	20%	2	0.4	4	0.8	4	0.8
El SD es preciso en sus movimientos	45%	4	1.8	4	1.8	4	1.8
El SD posee una herramienta de fácil uso para el usuario	20%	4	0.8	4	0.8	3	0.6
El SD es estable y con un rendimiento optimo	15%	4	0.6	4	0.6	4	0.6
<b>Total Pts</b>		3.6		4		3.8	
<b>Lugar</b>		3		1		2	
<b>¿Continuar?</b>		No		Desarrollar		No	

Tabla 12. Matriz de evaluación de conceptos para el proceso enfocado en mecánica y manufactura.

Criterios de seleccion	Peso	Conceptos					
		E		G		H	
		Clasificación	Evaluación Ponderada	Clasificación	Evaluación Ponderada	Clasificación	Evaluación Ponderada
El SD tiene un chasis modular y robusto	40%	3	1.2	5	2	4	1.6
El SD se transporta con facilidad	30%	4	1.2	3	0.9	3	0.9
El SD permite un fácil mantenimiento	30%	2	0.6	4	1.2	3	0.9
<b>Total Pts</b>		3		4.1		3.4	
<b>Lugar</b>		1		1		2	
<b>¿Continuar?</b>		No		No		Desarrollar	

Con base en los resultados de las tablas 11 y 12, se decide desarrollar la combinación G para el diseño del mecanismo del marcador y el control. Mientras que, para el material y método de fabricación del chasis la solución fue el H. Por lo tanto, el sistema diseñado integrará las siguientes soluciones identificadas:

- Tipo de Control: Proporcional e integral (PI).
- Convertir energía a movimiento lineal: Servomotor con adaptación de cremallera.
- Sujetador de marcador: Prensa.
- Método de manufactura de la estructura: Impresión 3D & Corte Laser.
- Materiales de chasis para la estructura: PETG & PMMA.

# Capítulo 4. Propuesta de diseño

## 4.1 Diseño del control

Como se observó en el marco metodológico, una de las combinaciones a desarrollar es la propuesta G, que detalla que el tipo de controlador a diseñar debe ser Proporcional-Integral (PI). A continuación, se centrará en este proceso.

En primera instancia, se realizó una toma de datos del comportamiento de los motores, midiendo el ciclo de trabajo mediante el método de modulación por ancho de pulsos (PWM, por sus siglas en inglés). Además de este valor, se calculó la velocidad instantánea del motor. Estos cálculos se realizaron durante 6 segundos, con una frecuencia de medición de cada 50 ms.

En la figura 25 se presenta gráficamente la respuesta de los motores ante una entrada de 150 PWM, equivalente a un ciclo de trabajo de aproximadamente el 58.8%. Cabe mencionar que la medición se realizó bajo condiciones cercanas a la carga completa que soportarán los motores durante el movimiento del robot móvil, y sobre una superficie completamente plana.

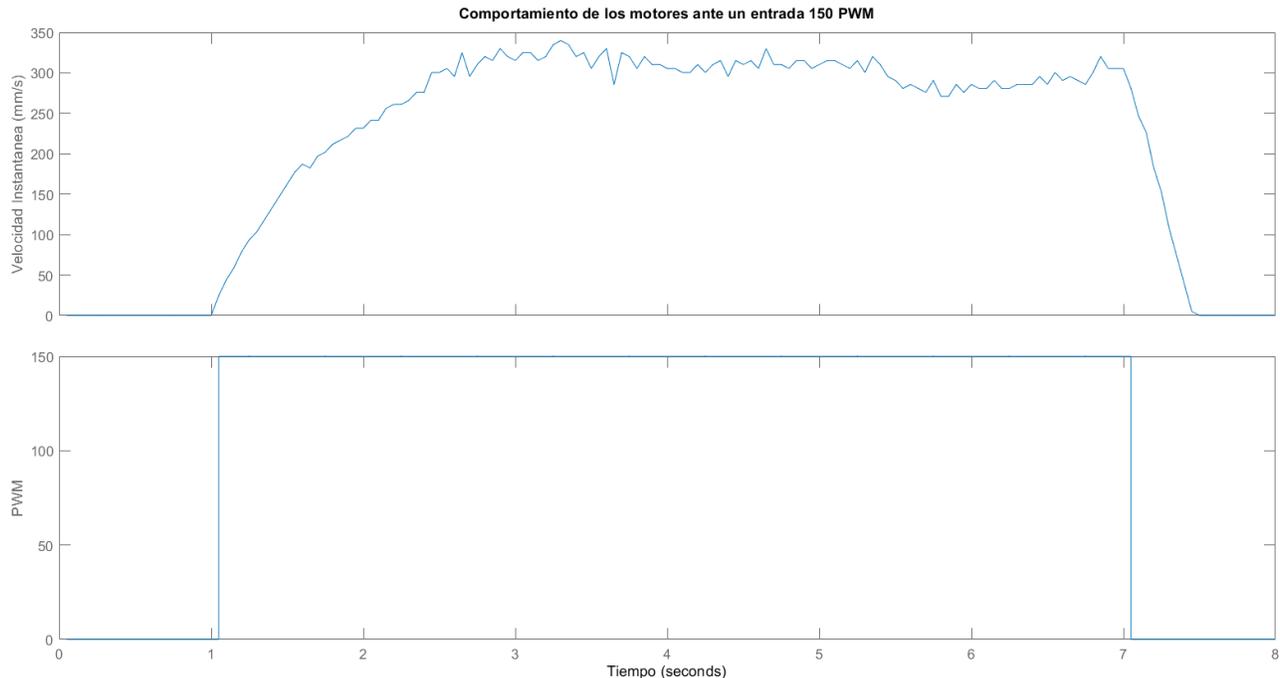


Figura 25. Gráfica del comportamiento de los motores ante una entrada PWM de 150.

Una vez conocidos estos datos, se procedió al modelo matemático de esta respuesta. Se utilizó como apoyo el software, especializado en modelado, análisis de datos y desarrollo de algoritmos [53], Matlab. La función de transferencia obtenida para estos motores se presenta en la ecuación 3, con un ajuste del 85%. Aunque este ajuste es menor al 90%, es la mejor estimación debido a la influencia de la frecuencia de muestreo en las variaciones de velocidad. Esto se debe a la naturaleza del encoder, que mide la posición, dirección y velocidad de los motores.

$$\text{Funcion de transferencia del motor}(z) = \frac{0.2312}{1 - 0.8827 z^{-1}} \quad (3)$$

Si la frecuencia de muestreo es demasiado baja, algunos pulsos del encoder podrían no ser registrados a tiempo, lo que introduce fluctuaciones y pérdida de precisión en los cálculos. Esto sucede porque el sistema no detecta cada cambio de posición con suficiente rapidez. Por otro lado, al aumentarla, se obtiene una lectura más estable, ya que se registra los pulsos de manera más continua. Sin embargo, esto puede sesgar el comportamiento real del motor, comprometiendo la precisión en la representación de su dinámica.

Una vez obtenido este modelo, se busca calcular los valores más adecuados para las constantes del controlador PI. Como primer acercamiento a esta tarea se quiere realizar por medio del método Ziegler-Nichols, cuyo procedimiento es ejecutar un ensayo escalón (step response) para obtener la respuesta del sistema y luego se ajustan los parámetros del PI con base en la forma de la curva [54], ver figura 26 junto con las Ec. 4 y 5, las cuales son las fórmulas para los parámetros a partir de los resultados ensayo.

$$Kp = 0.9 \frac{T}{L} \quad (4)$$

$$Ki = \frac{L}{0.3} \quad (5)$$

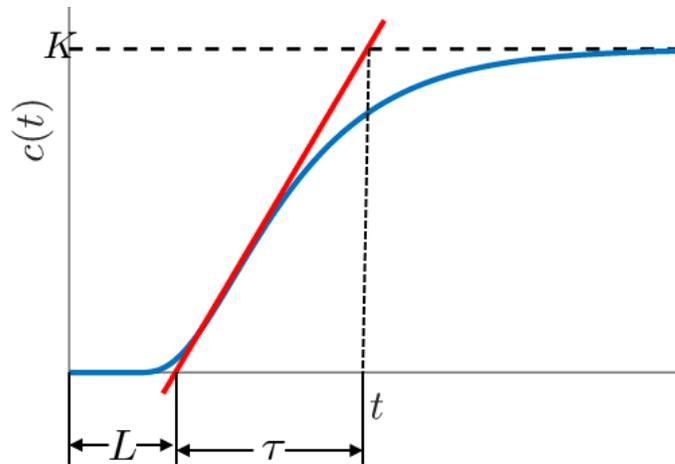


Figura 26. Método gráfico para obtener variables del control PI por Ziegler-Nichols [55].

Al aplicar el ensayo a la función de transferencia obtenida en la Ec.3 se tuvo como respuesta lo mostrado en la Figura 27.

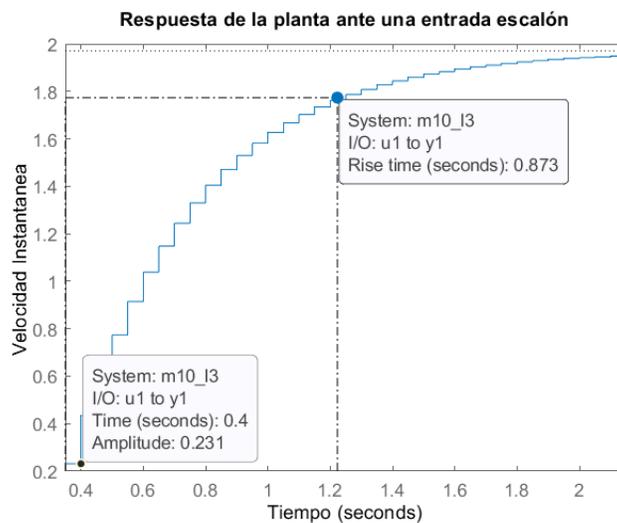


Figura 27. Gráfica de la respuesta de la planta ante una entrada escalón.

A partir de lo anterior entonces se determina que los parámetros del controlador proporcional-integral son los siguientes, Ec 6 y 7:

$$Kp = 0.9 \frac{0.873}{0.4} = 1.96 \quad (6)$$

$$Ki = \frac{0.4}{0.3} = 1.33 \quad (7)$$

La figura 28 muestra la respuesta del motor junto con el controlador PI, cuyos parámetros se determinaron mediante el método de Ziegler-Nichols.

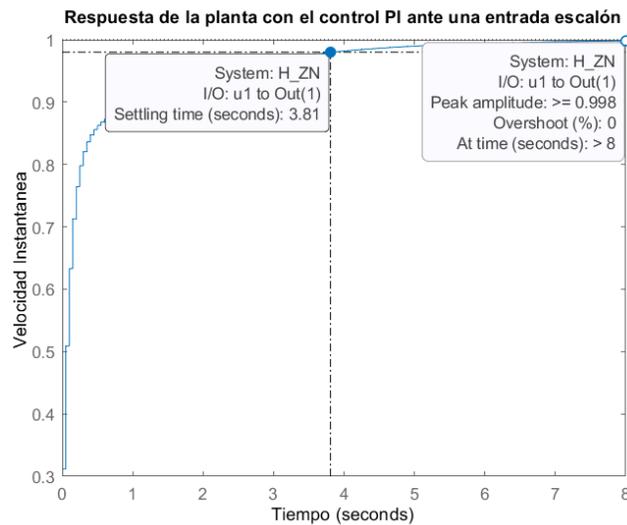


Figura 28. Gráfica de la respuesta de la planta con el control PI mediante Ziegler-Nichols ante una entrada escalón.

Asimismo, se calculó una segunda alternativa de parámetros para el controlador mediante la modificación del lugar de las raíces. La figura 29 muestra el lugar de las raíces de la planta sin el control PI, mientras que en la figura 30 se observa con el controlador aplicado para lograr el comportamiento deseado.

En este nuevo lugar de raíces, dos polos complejos conjugados fueron posicionados (Ec. 8), y se eliminó un polo que contribuía a la respuesta lenta del sistema (Ec. 9). Con esta configuración, el sistema obtiene una respuesta más rápida y menos oscilatoria. Manteniendo todos los polos dentro del círculo unitario, se garantiza además la estabilidad del sistema, evitando un crecimiento descontrolado en su salida.

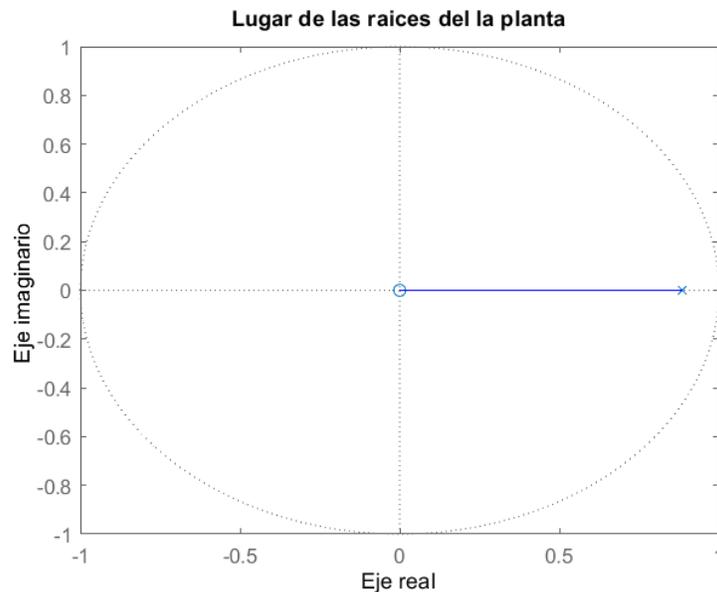


Figura 29. Lugar de las raíces de la planta.

$$Polos = [0.886 + 0.052i , 0.886 + 0.052i] \tag{8}$$

$$Ceros = [0.86] \tag{9}$$

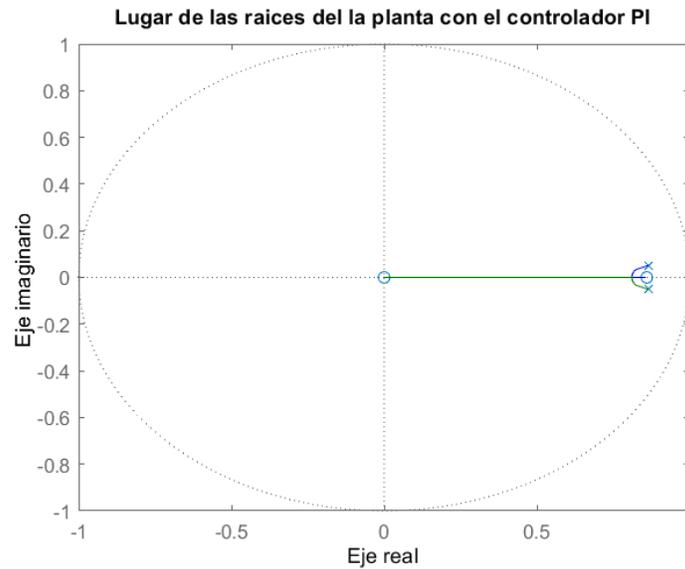


Figura 30. Lugar de las raíces de la planta con el controlador PI.

Mientras que en la figura 31, se tiene la respuesta del motor en conjunto con el controlador PI obtenido por la modificación del lugar de las raíces.

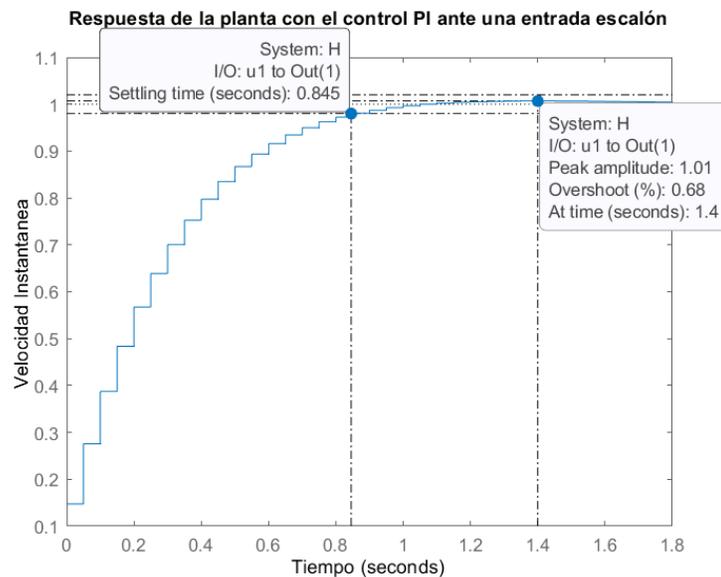


Figura 31. Gráfica de la respuesta de la planta con el control PI por medio de modificación del lugar de las raíces ante una entrada escalón.

Al comparar ambos enfoques, los parámetros obtenidos mediante la modificación del lugar de las raíces resultan ser la opción más adecuada para este control. Como se muestra en la tabla 13 de comparación de características de las curvas de respuesta, aunque el control por Ziegler-Nichols no presenta sobreimpulso, no logra compensar la diferencia significativa en el tiempo de asentamiento.

Tabla 13. Comparativa entre los dos métodos propuestos para obtener los parámetros del control PI.

<b>Parámetro</b>	<b>Control por Ziegler-Nichols</b>	<b>Control por Modificación del lugar de las raíces</b>
<b>Tiempo de estabilización (segundos)</b>	3.81	0.845
<b>Sobreimpulso (%)</b>	0	0.68

#### **4.2 Diseño del mecanismo para herramienta de dibujo.**

Como se determinó, en la solución del marco metodológico, se desarrollará un mecanismo asociado a la combinación G; el cual es consistente en el diseño de un dispositivo para dibujar con un marcador sobre superficies.

Este mecanismo consta inicialmente de un servomotor de 180° y una cremallera, como idea de base. El diseño por implementar se compone de tres piezas acoplables al motor:

1. Un engranaje conectado al eje del motor, figura 32.
2. Una cremallera que, mediante tornillos y un orificio pasante (ojo chino), se conecta a otra pieza de soporte, figura 33.
3. Una pieza de soporte que asegura el alineamiento del engranaje y la cremallera, permitiendo así su desplazamiento vertical cuando el motor es activado, transmitiendo el movimiento a través del engranaje, figura 34.



Figura 32. Engrane para el mecanismo de la herramienta.

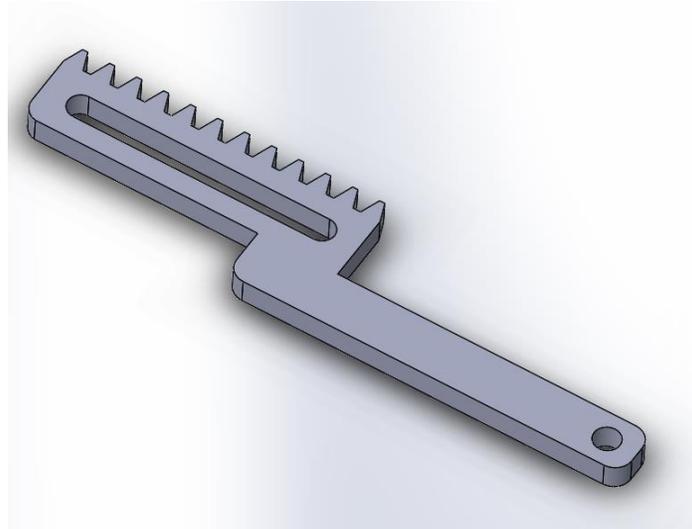


Figura 33. Cremallera para el mecanismo del marcador.

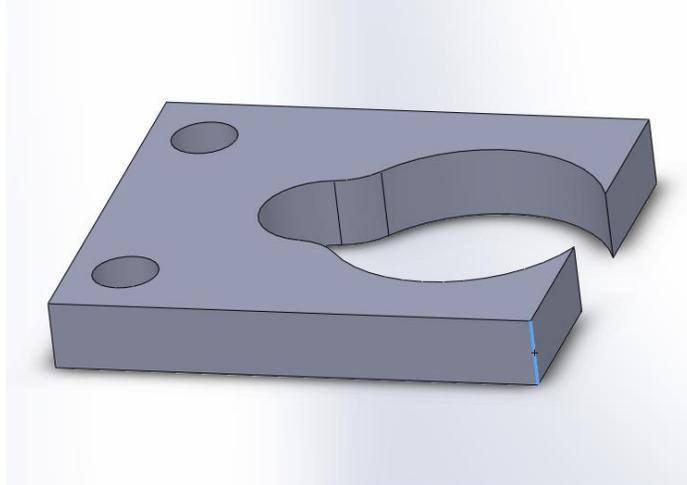


Figura 34. Soporte para la cremallera en el mecanismo para la herramienta.

Además, la cremallera tiene un diseño específico que permite fijar en uno de sus extremos un objeto, facilitando así su uso con diferentes herramientas de dibujo. Las especificaciones o planos de las partes se pueden ubicar en los apéndices.

Para la producción del engranaje y la cremallera, se contemplan dos opciones de fabricación: impresión 3D y corte láser, según la combinación H. Aunque ambos métodos tienen sus ventajas, para un engranaje y una cremallera de este tamaño, el corte láser resulta una opción superior.

En primer lugar, el corte láser ofrece una alta precisión en detalles finos, algo esencial en piezas pequeñas como los engranajes y las cremalleras, donde los dientes deben encajar de muy buena manera. Mientras que la impresión 3D puede presentar limitaciones en la resolución y generar irregularidades en piezas tan detalladas, el corte láser produce bordes limpios y exactos, logrando un mejor ajuste y rendimiento en el mecanismo.

Otra ventaja es la durabilidad y robustez. Al utilizar el corte se proporciona mayor durabilidad a las piezas, debido a que se emplearía PMMA, reduciendo el desgaste en componentes sujetos a movimiento constante, como ocurre entre un engranaje y una cremallera.

Además, el láser es considerablemente más rápido en la fabricación de piezas pequeñas. Mientras que la impresión podría requerir un mayor consumo de tiempo para completar cada componente.

En conclusión, la solución propuesta es el mecanismo mostrado en la figura 35, fabricado mediante corte láser y ensamblado mediante ajustes y tornillos.

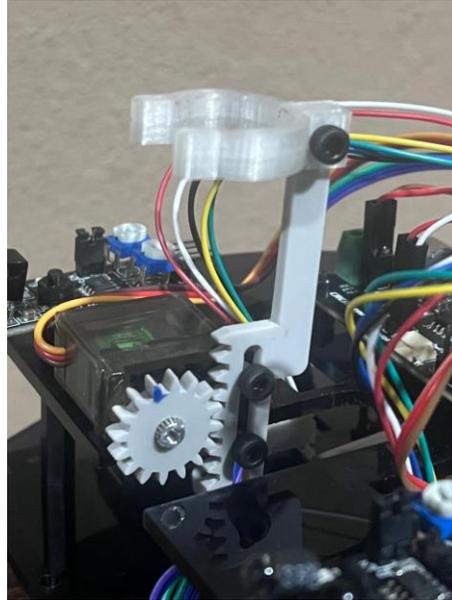


Figura 35. Mecanismo de herramienta para sujetar un marcador y dibujar en superficies.

#### **4.3 Diseño del sujetador para el marcador**

Otra parte fundamental del diseño de la herramienta es la pieza que sostendrá el marcador de manera estable. Como se detalló en la combinación G, la prensa será la base conceptual para alcanzar este objetivo.

Esta pieza tiene la forma presentada en la figura 36. Tal como se puede observar en las especificaciones, fue diseñada para un marcador estándar utilizado en aulas, en particular un marcador de pizarra. A partir de estas dimensiones, se desarrolló una prensa que sujeta el marcador con la presión adecuada para el uso en el robot.

Cabe destacar que solo se necesita modificar una medición en el diseño para adaptar esta prensa a cualquier tipo de marcador disponible en el mercado.

Además, es importante resaltar que esta pieza es fácil de cambiar, ya que su acoplamiento con la estructura del motor se realiza mediante un tornillo a la cremallera. Sin embargo, aunque su diseño permita un mantenimiento o ajuste sencillo, esto no implica que carezca de robustez en sujeción, tanto entre la pieza y el chasis como entre la pieza y el marcador. La prensa está diseñada para ofrecer una sujeción firme y confiable, lo cual espera dar un rendimiento óptimo del sistema en su conjunto.

Aunque se intentó continuar con el uso de corte láser por las razones mencionadas, esta opción no fue viable debido a la imposibilidad de alcanzar el grosor requerido. En cambio, al optar por la impresión 3D con material PETG, se pudo fabricar una pieza que cumple con las características deseadas, especialmente en términos de flexibilidad. Esta flexibilidad es crucial para evitar que la pieza se quiebre al insertar el marcador. Esta elección no solo garantiza que el componente cumpla con los requisitos de diseño, sino que también aporta la versatilidad necesaria para su funcionamiento adecuado.

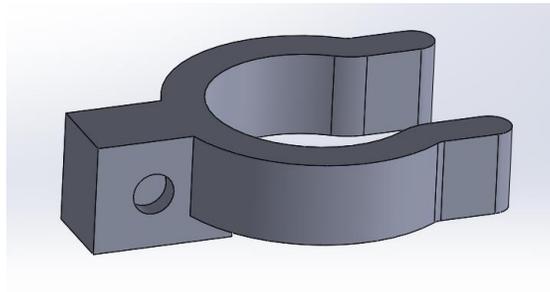


Figura 36. Prensa para sujetar el marcador y acoplarlo al mecanismo de la herramienta.

#### **4.4 Diseño del chasis externo e interno.**

Para el diseño de la parte exterior del chasis, figura 37, se consideraron varios aspectos. En primer lugar, se buscó reducir la exposición de los componentes al ambiente mediante una estructura que funcione como un "caparazón", diseñado para cubrir la mayor cantidad posible de componentes y minimizar su contacto con factores externos.

Además, se priorizó la facilidad de desensamblaje. Para lograr un mantenimiento y ajustes más sencillos, se optó por un diseño con el menor número de piezas, tanto internas como externas, facilitando así el montaje y desmontaje.

Otro aspecto importante fue la capacidad de apilar varios dispositivos. Para esto, el chasis se diseñó con una parte superior de forma regular, lo que permite un transporte estable.

Pensando en la interacción directa con los usuarios, especialmente niños, se tomó en cuenta la seguridad y comodidad al tacto, eliminando esquinas afiladas y bordes bruscos. La estructura fue diseñada con formas suaves para reducir cualquier riesgo durante su manipulación, dado su propósito educativo.

También, el "caparazón" asegura una adecuada distribución del peso interno, contribuyendo a evitar vuelcos, principalmente durante el frenado. Esto permite una mayor estabilidad y reduce el riesgo de caídas accidentales.

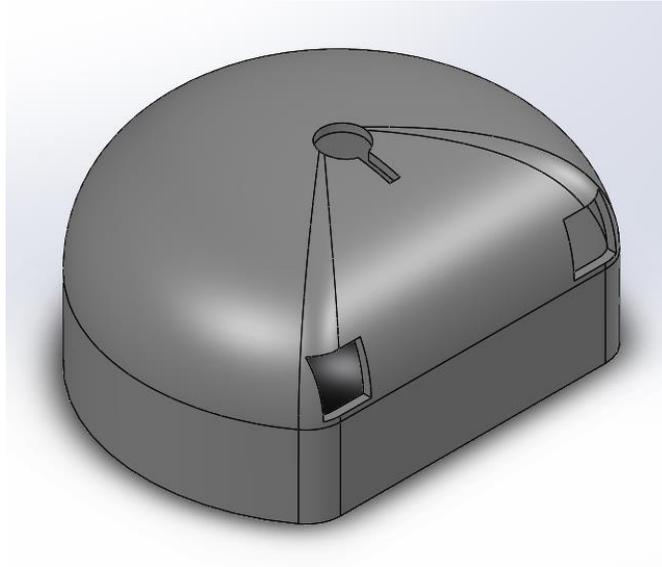


Figura 37. Parte externa del chasis para el Atta-Bot STEM.

Siguiendo esta misma línea de diseño, el siguiente paso es abordar las consideraciones para las partes internas del chasis, esenciales para el desempeño y durabilidad del sistema en su conjunto. Como se observa en las figuras 38 y 39, el diseño del chasis incluye dos niveles internos, pensados para optimizar el funcionamiento y disposición de cada componente. La altura adicional permite que el mecanismo del marcador pueda activarse y desactivarse sin inconvenientes, a la vez que permanece protegido por la estructura externa.

En términos de distribución, la batería se ubicó lo más cerca posible del suelo, de modo que el centro de masa se mantenga bajo y proporcione estabilidad al movimiento. Además, es esencial que la batería no esté en contacto físico directo con otros componentes; por ejemplo, debe estar separada del microprocesador, aunque situada justo debajo de este.

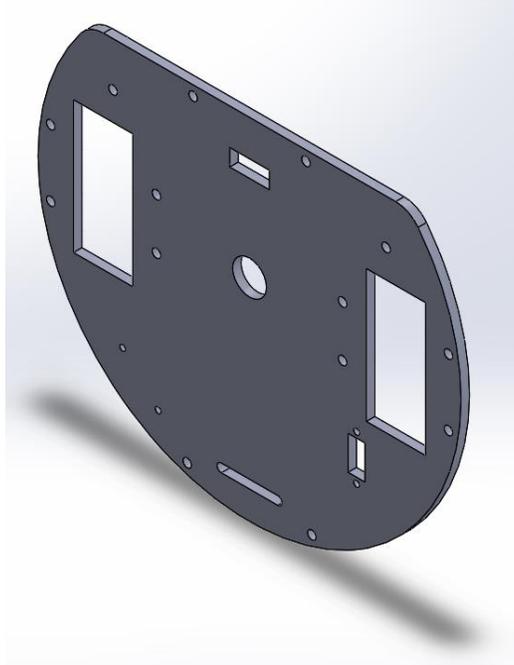


Figura 38. Nivel inferior/base del chasis interno para el Atta-Bot STEM.

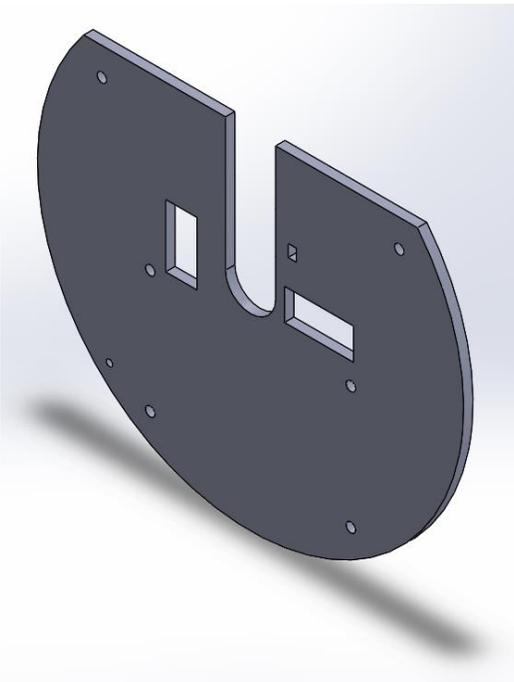


Figura 39. Nivel Superior del chasis interno para el Atta-Bot STEM.

Para lograrlo, se diseñó un nivel superior a la base, donde se coloca el microprocesador sobre la batería, pero sin contacto directo. Esta disposición asegura que el peso esté bien distribuido, lo cual ayuda a evitar que el sistema se vuelque durante el frenado, ya que la mayor parte de la carga se encuentra en la parte trasera.

El segundo nivel, por su parte, también favorece a los sensores de obstáculos, ya que la elevación permite un mayor rango de detección en altura. Con esta configuración, el diseño logra un equilibrio en la distribución del peso y optimiza el funcionamiento de cada componente dentro del espacio disponible.

Otra consideración importante en el diseño fue la implementación de agujeros para sujetar los componentes mediante tornillos y tuercas. En lugar de estandarizar el tamaño de los agujeros en todo el diseño, se adaptaron específicamente a las dimensiones de cada componente según la colocación prevista. Por ejemplo, si el módulo de "power-boost" requiere tornillos M2 en su área de montaje, el diseño se ajustó a esa medida en lugar de usar agujeros M3, que son comunes en componentes estructurales. De esta forma, aunque se usan tuercas para asegurar los componentes, se evita el juego de movimiento que podría surgir al emplear agujeros de tamaños no adecuados, garantizando así una sujeción estable y precisa.

Por último, para la parte interna del chasis, se eligió continuar con el corte láser y el uso de PMMA, principalmente debido a la precisión que este método ofrece en los cortes, un aspecto crítico en los orificios para fijar componentes. No obstante, para la estructura externa se prefirió la impresión 3D, considerando la naturaleza del material utilizado para este tipo de proceso. Según las propiedades detalladas en el marco metodológico, el PETG resultó ser más adecuado que el PMMA, pues se ajusta bien a los requisitos de flexibilidad y resistencia que se buscan para este componente.

#### 4.5 Implementación de la solución en el código.

A continuación, se presenta una descripción de cada una de las funciones implementadas en el código:

- **advanceDesiredDistance**

La función `advanceDesiredDistance` permite que el robot avance una distancia especificada en milímetros. Primero, verifica si la distancia deseada es negativa; si es así, activa una bandera que indica que el robot debe moverse en reversa. Para mantener una precisión en la ejecución de esta función, se utiliza un temporizador con intervalos de 25 milisegundos. En cada ciclo, calcula la velocidad actual de cada rueda a partir de los datos del encoder, que registra la cantidad de pulsos desde el último cálculo de velocidad.

Luego, la función calcula el valor de PWM adecuado para cada rueda usando un controlador PI, que ajusta la velocidad en función del error entre la velocidad deseada y la velocidad real. Dependiendo de los cambios en los valores de PWM, se actualiza la configuración del puente H para asegurar que el motor reciba las señales correctas. A medida que el robot se mueve, la función calcula la distancia recorrida usando los datos del encoder y la compara con la distancia deseada. Si se ha alcanzado la distancia establecida, el robot se detiene, se reinician las variables de control PI y los contadores del encoder, y la función devuelve un valor `true` para indicar que se ha completado la tarea.

Un aspecto destacable de esta función es el uso de un factor de corrección por inercia. El cálculo de este factor se basa en una relación constante observada en las mediciones del movimiento lineal. Aunque los encoders reportan que se ha alcanzado la distancia objetivo y se ejecuta la acción de frenado, los motores, al detenerse de forma abrupta tras mantener una velocidad constante, aún conservan algo de energía, lo que hace que sigan avanzando unos milímetros adicionales. Esta relación se evidencia en los datos a continuación, tabla 14 y figura 40.

Tabla 14. Datos de calibración para el factor de corrección por inercia.

Teorico (mm)	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7	Exp 8	Exp 9	Exp 10	Promedio Exp	Factor de corrección por inercia
50	54.3	54.6	54.4	54.5	54.2	54.7	54.3	54.5	54.4	54.3	54.42	0.9188
100	109	109	109	109	109	109	109	109	109	108.9	108.83	0.9189
150	163	163	163	163	163	163	163	163	163	162.8	163.02	0.9201
200	217	218	217	218	217	217	217	217	218	217.6	217.39	0.9200
300	326	326	326	326	326	326	326	326	326	326	326.05	0.9201

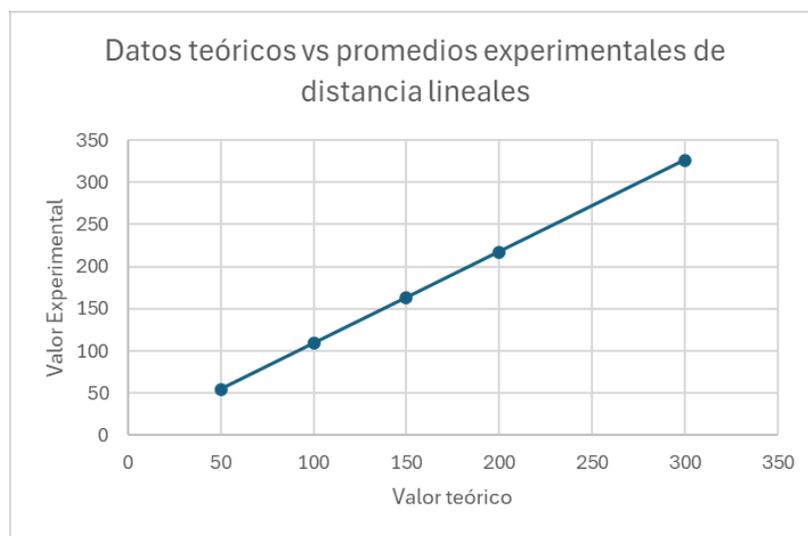


Figura 40. Gráfica sobre datos teóricos vs experimentales de las distancias lineales ejecutados por el Atta-Bot STEM.

- **turnDesiredAngle**

Esta función se encarga de girar el robot hasta el ángulo especificado. Si el ángulo es negativo, activa una bandera que indica que el giro debe realizarse en sentido antihorario. Al igual que en la función anterior, utiliza un temporizador de 25 milisegundos para calcular la velocidad de cada rueda. Este cálculo de velocidad se realiza a partir de los datos de los encoders, que miden el cambio en los pulsos desde el último cálculo.

La función convierte el ángulo deseado en una distancia lineal que representa la distancia que cada rueda debe recorrer para lograr el giro especificado, ver ecuación 10. Luego, calcula el PWM necesario para cada rueda mediante un controlador PI que ajusta la velocidad en función del error entre la velocidad deseada y la real. Dependiendo de los cambios en los valores de PWM, se actualiza la configuración del puente H para asegurar que los motores se comporten correctamente en el giro. A medida que el robot gira, la función calcula la distancia recorrida y verifica si se ha alcanzado el objetivo. Si es así, detiene el robot, reinicia las variables de control y devuelve un valor true para indicar que el giro se ha completado.

$$\text{Ángulo a distancia lineal} = \left( \frac{\text{Ángulo deseado}}{360.0} \right) * PI * \text{Distancia rueda a rueda}; \quad (10)$$

- **controlServo**

La función se utiliza para controlar el estado de la herramienta integrada, que está sujeta al servo del robot. Esta función recibe un parámetro, set, que indica si la herramienta debe activarse o desactivarse. Si set es igual a 1, la herramienta se activa al colocar el servo en un ángulo de 110 grados. Si set es igual a 0, se desactiva la herramienta colocando el servo en un ángulo de 180 grados. Esta función permite controlar fácilmente la herramienta del robot, permitiendo alternar su posición con precisión.

## Capítulo 5. Resultados y análisis

### 5.1 Pruebas de validación

La validación del proyecto se llevó a cabo mediante la construcción de un prototipo funcional del robot diseñado, sometido a distintas pruebas para verificar su conformidad con las métricas definidas en la fase de especificación. Solo se realizaron pruebas físicas en aquellas métricas que así lo requerían, mientras que otras se evaluaron a partir de criterios alternativos. En el apéndice se encuentra el detalle de las mediciones del proceso de validación, y en esta sección se presentan exclusivamente los resultados obtenidos.

#### 5.1.1 Prueba de validación #1

Primero, se busca verificar la exactitud de los movimientos en línea recta realizados por el robot, por lo que se diseñó la primera prueba de validación. En esta, se programó al robot para que avanzara una distancia determinada. Luego, se colocó el robot sobre un pliegue de papel, asegurando que los centros de las ruedas estuvieran alineados. Durante el avance, se utilizó la nueva herramienta integrada, el marcador, lo que facilitó la toma de datos al dejar una marca clara en la superficie. Este procedimiento se repitió 30 veces para cada distancia, evaluando un total de cinco distancias. En la tabla 15 se presenta un resumen de los resultados de la prueba. Las mediciones detalladas y varias imágenes como prueba de validación están disponibles en los apéndices.

Tabla 15. Resumen y estadísticas de los resultados de la validación #1.

Resultados	Distancia (mm)				
	50	100	150	200	300
Promedio	50.0433	100.1	150.123	200.11	300.16
% Error	0.08667	0.1	0.08222	0.055	0.05333
Moda	50	99.9	150.1	200.1	300.2
Máximo	50.4	100.7	150.7	200.8	301.1
Mínimo	49.6	99.6	149.6	198.9	298.7
Desviación Estándar	0.23146	0.29595	0.28367	0.42778	0.57989

Como apoyo para el análisis, se elaboró un diagrama de bigotes para cada una de las distancias, los cuales se encuentran de las Figuras 41 a 45.

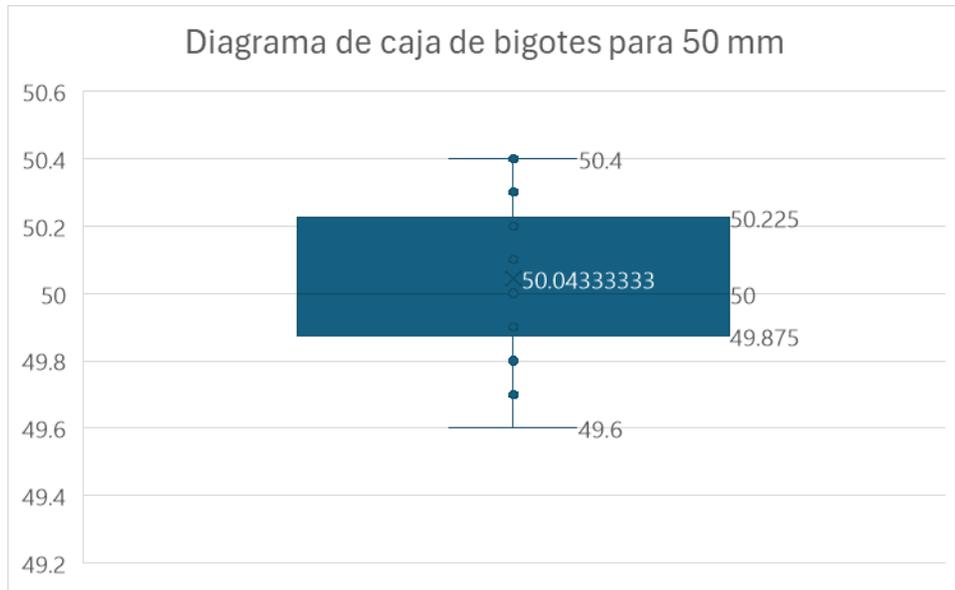


Figura 41. Diagrama de caja de bigotes para la distancia lineal de 50 mm.

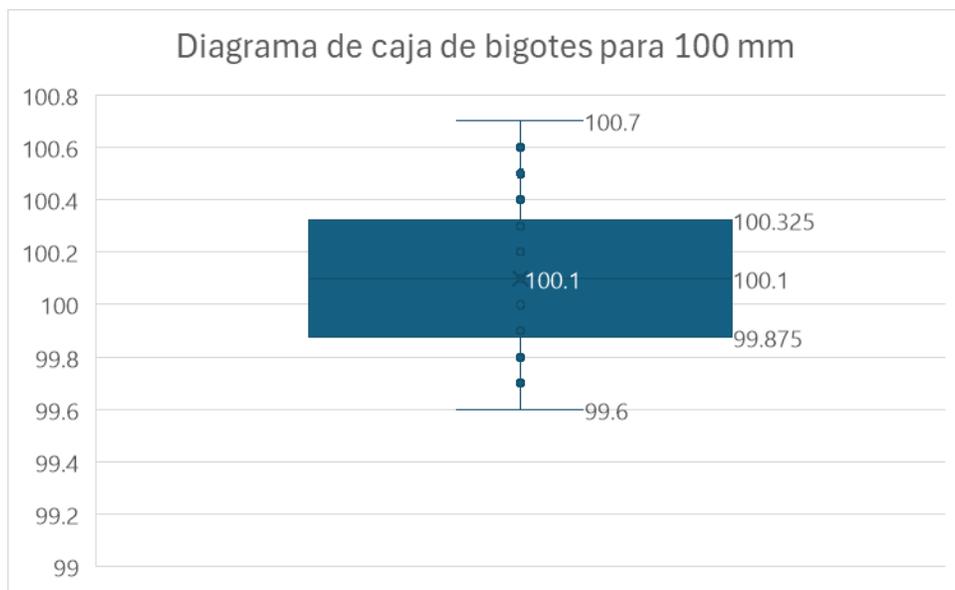


Figura 42. Diagrama de caja de bigotes para la distancia lineal de 100 mm.

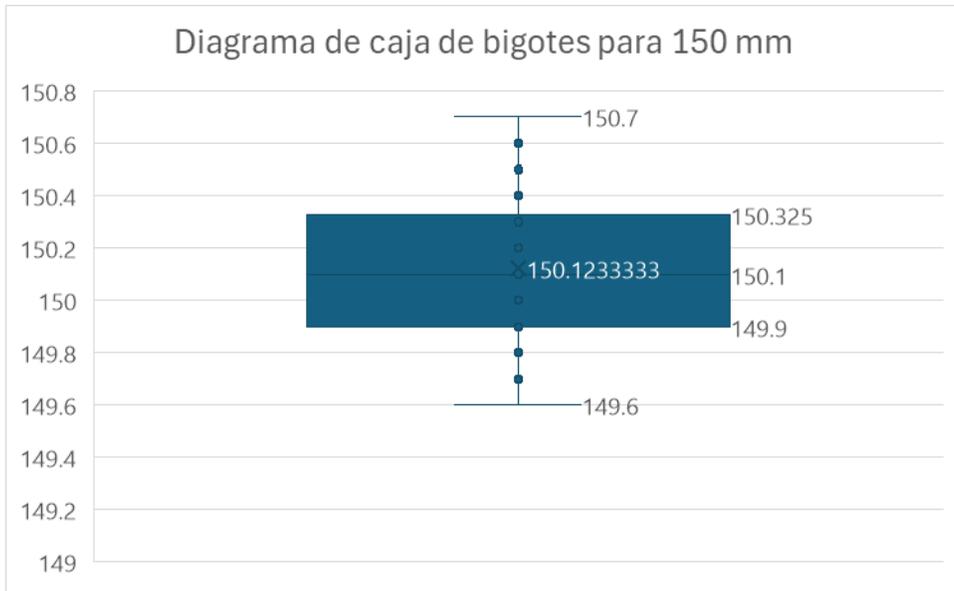


Figura 43. Diagrama de caja de bigotes para la distancia lineal de 150 mm.

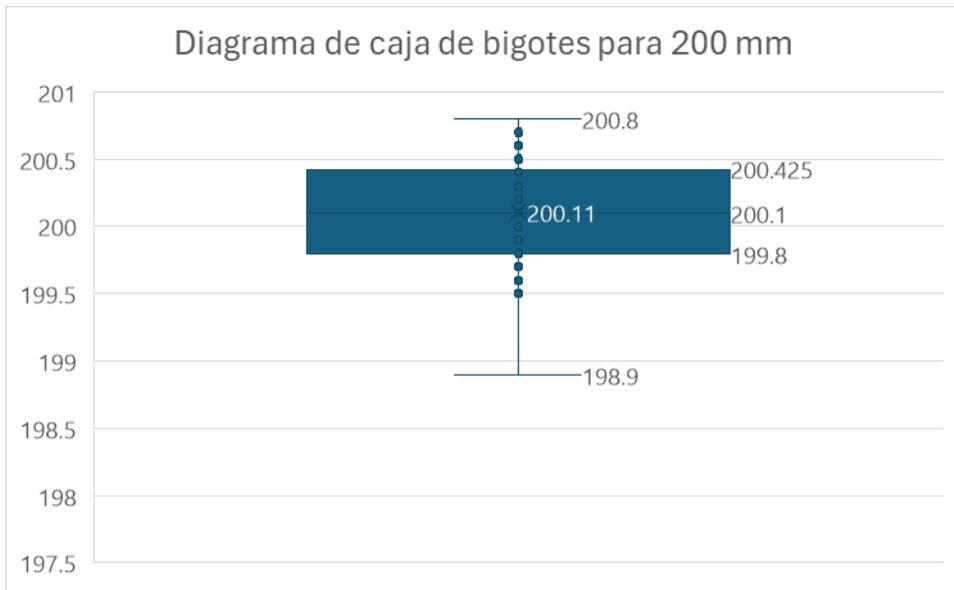


Figura 44. Diagrama de caja de bigotes para la distancia lineal de 200 mm.

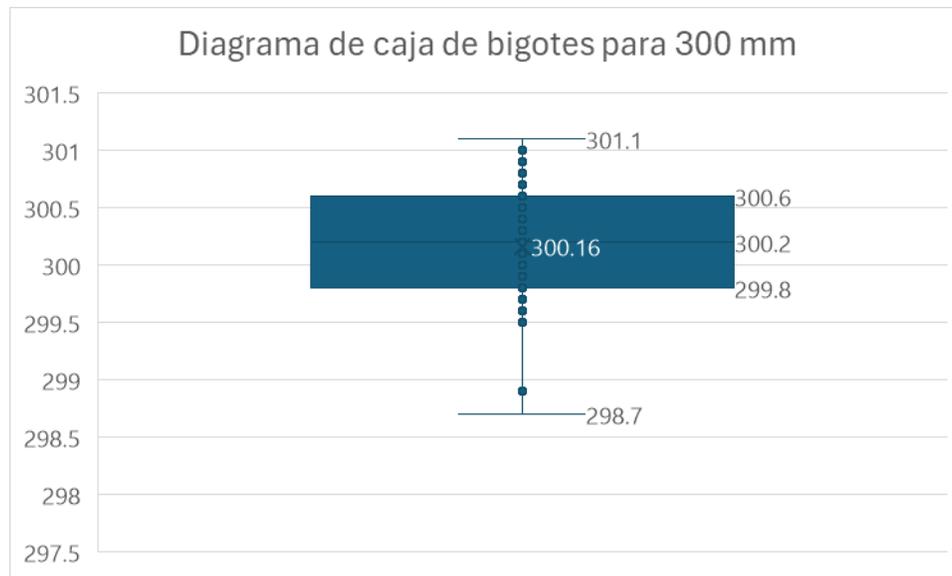


Figura 45. Diagrama de caja de bigotes para la distancia lineal de 300 mm.

Los promedios de las mediciones muestran que los resultados alcanzados se sitúan dentro del rango de valores óptimos establecidos en la fase de especificaciones, donde se indicó que el porcentaje de error debe ser menor a un 4%. Asimismo, al examinar los valores máximos y mínimos de cada conjunto de datos, se observa que ninguno de estos superó los valores ideales de precisión mencionados previamente. Detallando, todos los porcentajes de error se mantienen por debajo del 0.2%. La desviación estándar oscila entre 0.23 mm y 0.6 mm, lo que indica una alta precisión. Por lo tanto, se puede afirmar que el robot satisface los criterios de precisión en su movimiento lineal.

### 5.1.2 Prueba de validación #2

En la segunda prueba, se busca validar la precisión de los movimientos angulares del robot. En esta fase, el robot se programó para avanzar una distancia específica, girar un ángulo determinado y luego continuar avanzando. Se colocó el robot sobre un pliegue de papel, asegurando que los centros de las ruedas estuvieran alineados. Durante el proceso, se utilizó la nueva herramienta integrada, el marcador, lo que facilitó la medición de los datos al dejar marcas claras en la superficie. Este método se eligió para asegurar que los resultados fueran más precisos y fáciles de interpretar. Al igual que en la prueba anterior, se repitió este procedimiento 30 veces para cada ángulo evaluado y abarcando un total de seis ángulos diferentes. En la tabla 16 se presenta un resumen de los resultados de la prueba. Las mediciones detalladas y varias imágenes como prueba de validación están disponibles en apéndices.

Tabla 16. Resumen y estadísticas de los resultados de la validación #2.

Resultados	Ángulo (°)					
	45	90	120	180	270	360
Promedio	44.95	89.8667	119.85	179.85	269.867	362.833
% Error	0.111111	0.14815	0.125	0.083333	0.04938	0.78704
Moda	45	90	120	180	270	363
Máximo	45.5	90.5	120.5	180.5	270.5	364
Mínimo	44.5	89	119	179	269	360
Desviación Estándar	0.35598	0.45359	0.47616	0.47616	0.50742	1.04497

Como apoyo para el análisis, se elaboró un diagrama de bigotes para cada uno de los ángulos, los cuales se encuentran de las Figuras 46 a 51.

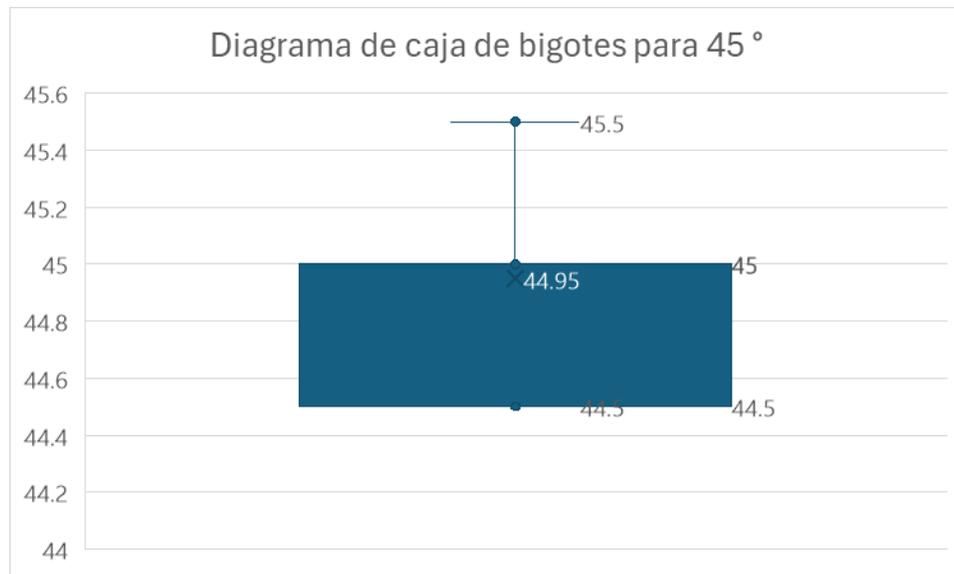


Figura 46. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 45°.

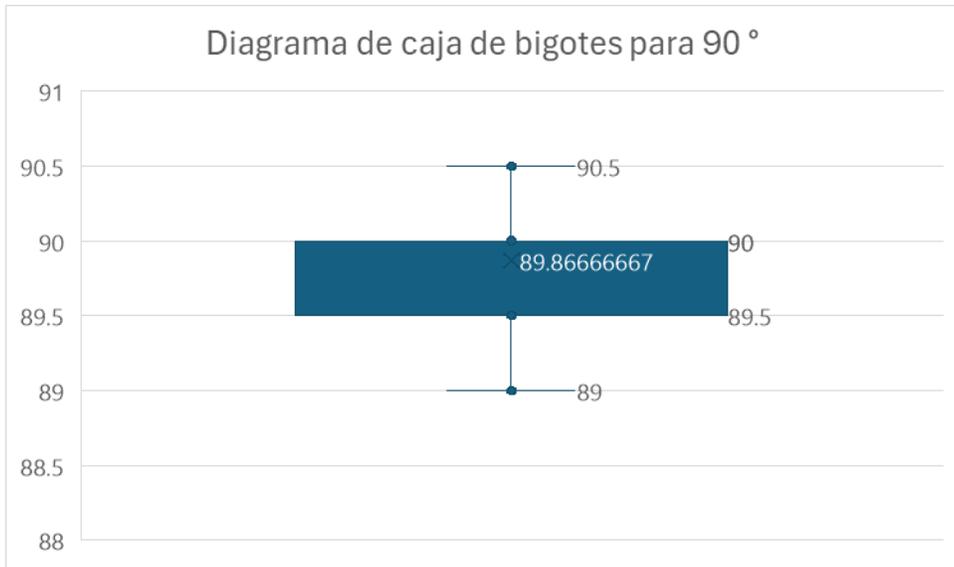


Figura 47. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 90°.

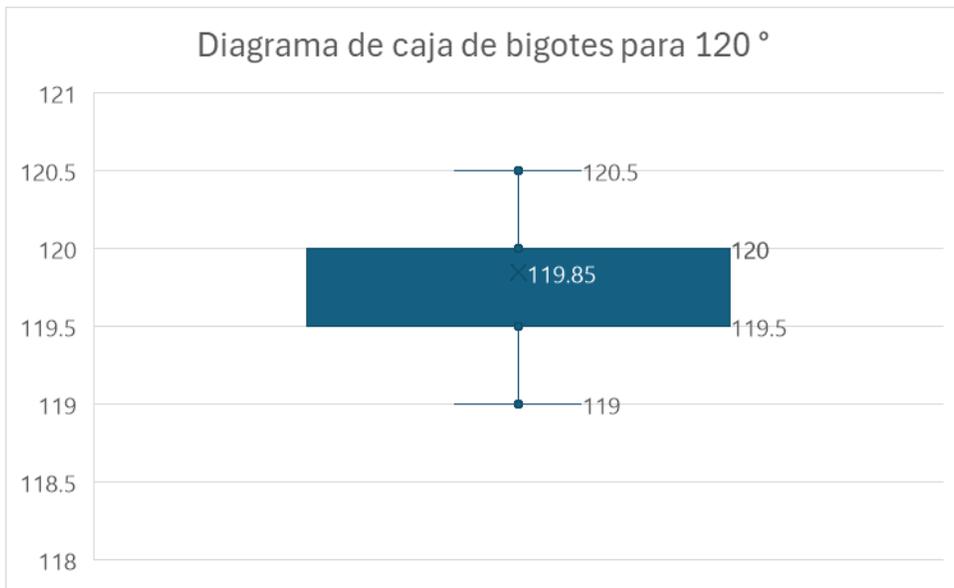


Figura 48. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 120°.

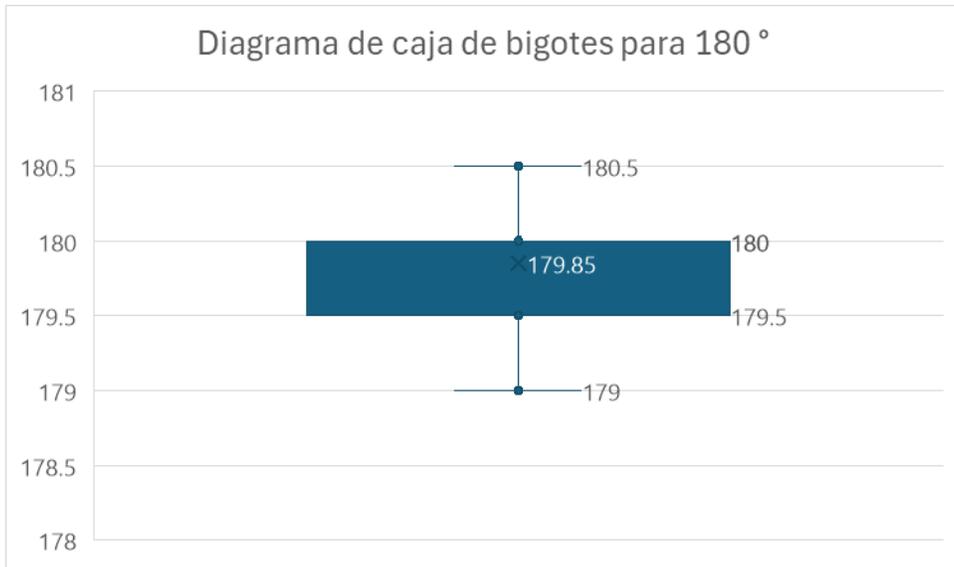


Figura 49. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 180°.

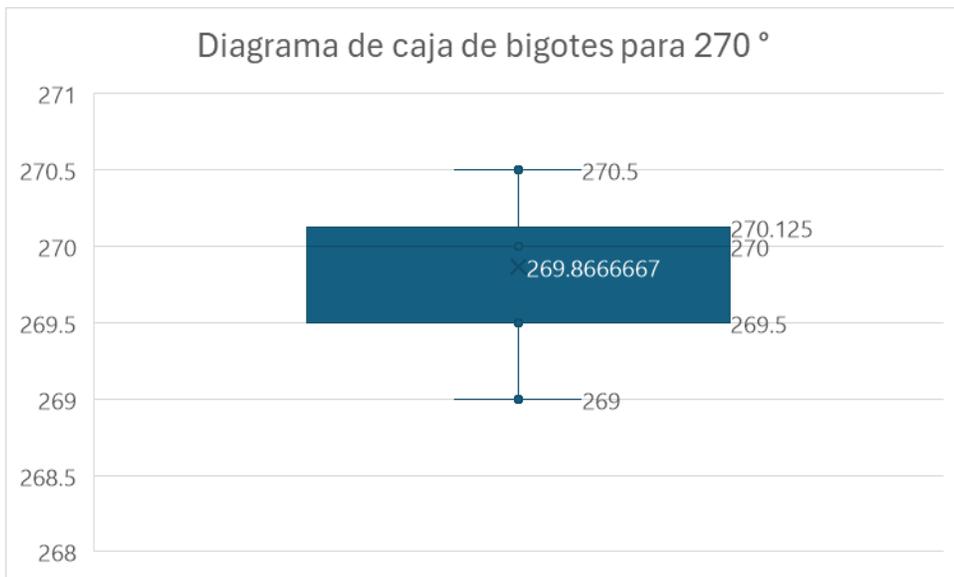


Figura 50. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 270°.

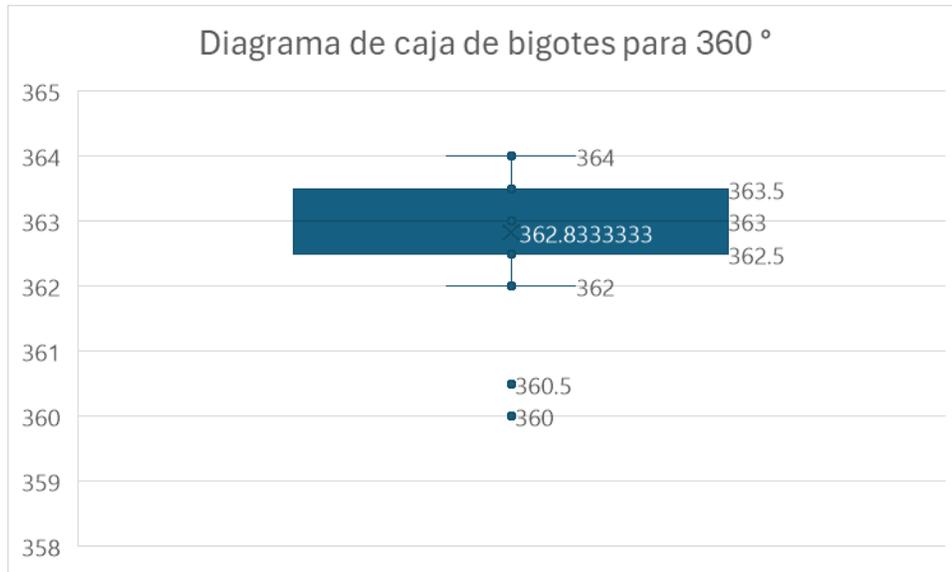


Figura 51. Diagrama de caja de bigotes para la distancia angular de 360°.

En cuanto a los giros, los promedios de las mediciones muestran que los resultados alcanzados también se sitúan dentro del rango de valor ideal establecido en la fase de especificaciones, cuyo porcentaje de error debe ser menor a un 4%. Detallando, todos los porcentajes de error se mantienen por debajo del 0.8%. Asimismo, al examinar los valores máximos y mínimos de cada conjunto de datos, se observa que ninguno de estos superó los valores ideales de precisión mencionados previamente. La desviación estándar oscila entre 0.35° y 1.05°, lo que indica una alta precisión. Por lo tanto, se puede afirmar que el robot satisface los criterios de precisión en su movimiento angular.

En comparación con la primera versión del Atta-Bot STEM [25], se ha logrado una mejora significativa en la precisión de los movimientos. En el movimiento lineal, el porcentaje de error máximo se redujo de un 1.4% en la versión anterior a un notable 0.1% en la actual. Del mismo modo, en el movimiento angular, el error se ha disminuido a un 0.8%, mientras que en la versión anterior se registraron errores de hasta un 3.8%. Estos resultados evidencian el avance en el diseño y la implementación del control en el Atta-Bot STEM, lo que se traduce en un desempeño más preciso y confiable en las tareas asignadas.

Cabe destacar que tanto en la prueba 1 y 2, el mayor juego observado en la posición del marcador ocurrió durante la prueba de giro de 360 grados, donde se registró un juego de un milímetro (1mm). Fuera de esta situación, no se detectó ningún juego en el marcador, lo que resalta la efectividad del diseño, herramienta y el chasis como un conjunto, en mantener la estabilidad y no introducir errores precisión en el sistema.

También, en las pruebas de validación 1 y 2, se analizó si el robot se volcaba hacia adelante o hacia los lados al frenar. En ambas pruebas, no se observó ningún vuelco, lo que indica que el diseño y la estabilidad del Atta-Bot STEM son adecuados. Este resultado cumple con la métrica establecida para garantizar la seguridad y la funcionalidad del robot durante su operación. La habilidad del robot para detenerse sin volcarse evidencia una adecuada redistribución del peso en el sistema, así como un diseño del chasis que favorece este equilibrio durante el movimiento y frenado.

Por último, se aclara que las condiciones de la prueba de validación 1 y 2 se llevaron a cabo en un entorno de superficie completamente plano, sin desniveles, grietas o hendiduras y utilizando una base de cartón de presentación. Además, para ambas pruebas la cantidad muestras tomadas tiene más del 90% de la potencia estadística, es decir que estas validación tienen un 90% de probabilidades de detectar una diferencia significativa en los datos si la hubiera.

### **5.1.3 Prueba de validación #3**

En la tercera prueba de validación, se llevó a cabo una simulación utilizando el software SolidWorks para evaluar la resistencia estructural del Atta-Bot STEM ante una caída de 90 cm, equivalente a la altura de una mesa, figura 52. Los resultados de la simulación demostraron que el robot no presentaba ninguna deformación significativa tras la caída, lo que resalta la robustez de su diseño.

Además, a partir de esta prueba, se calculó el factor de seguridad, el cual superó el indicador establecido en el objetivo dos, que requería un valor mayor a 2, figura 53. Este hallazgo no solo valida la integridad del diseño del Atta-Bot STEM, sino que también proporciona confianza en su capacidad para resistir a entornos de alta manipulación.

En la misma línea de análisis, se tomó en consideración la normativa IK, que establece criterios de resistencia para dispositivos electrónicos. A partir de los cálculos realizados, se contempló una energía de 3.97 julios, que podría ser generada por la fuerza de impacto al caer desde esta altura.

El objetivo es que el chasis del robot cumpla con el nivel IK08. Los resultados de la simulación mostraron que el chasis no presentaba ninguna deformación significativa tras la caída, lo que indica que cumple con esta normativa. No se omite destacar que estas pruebas también se llevaron a cabo en espacio físico real y se cumple lo mostrado en la figura 52. No hubo daño estructural a simple vista daño y mantuvo su normo-funcionamiento.

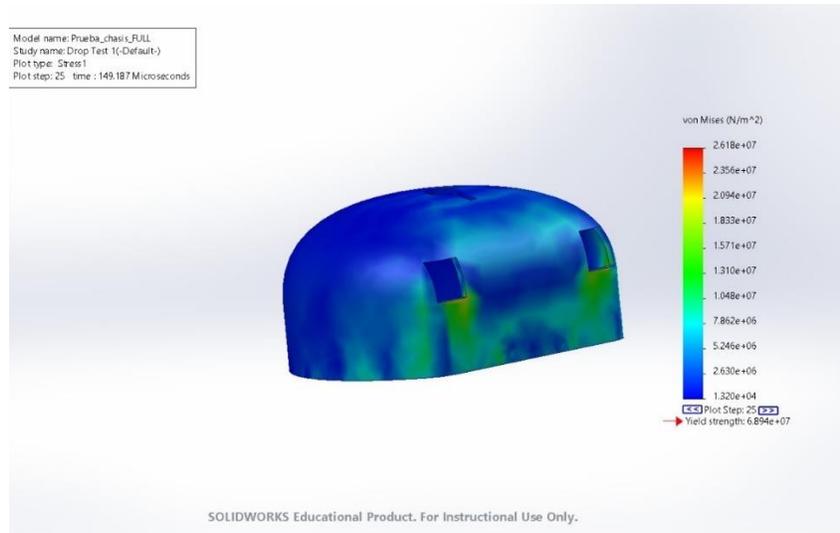


Figura 52. Simulación de la resistencia del chasis ante una caída desde 90 cm con el peso actual del Atta-STEM (450 g).

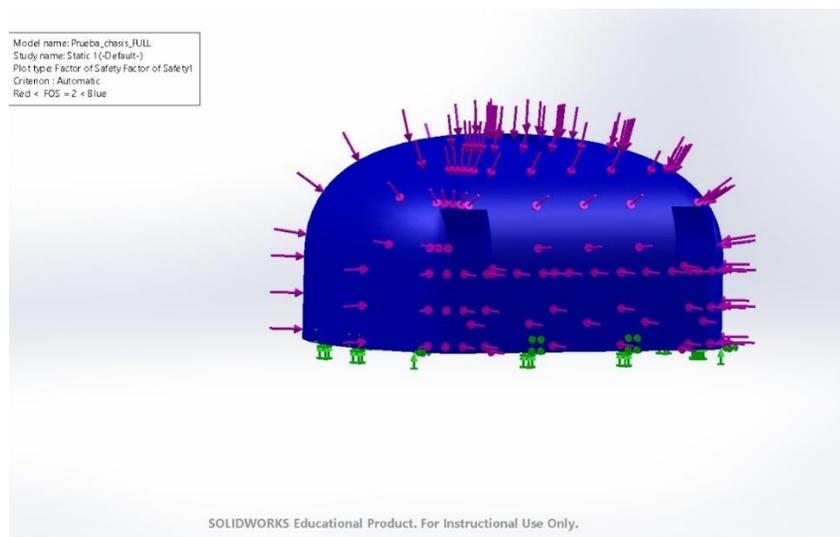


Figura 53. Simulación de factor de seguridad a partir de los resultados de la simulación mostrada en la figura 52.

#### 5.1.4 Prueba de validación #4

Como cuarta prueba de validación, se invitó a cinco usuarios de distintas edades a realizar el montaje y desmontaje del pilot del sujetador en Atta-Bot STEM. Participaron dos niños, uno de 11 años y otro de 9 años, así como tres adultos.

Cabe destacar que, para obtener una potencia estadística del 80% se habría requerido una muestra de 11 usuarios. Sin embargo, se seleccionó una muestra basada en la disponibilidad, ya que en esta prueba no solo se evaluó el desmontaje y montaje del pilot, sino que también se enseñó muy brevemente el proceso a cada usuario para garantizar la correcta ejecución. Por lo tanto, el tamaño de la muestra aplicada es justificable.

A continuación, se presentan los promedios de los tiempos de montaje y desmontaje para cada usuario, tabla 17:

Tabla 17. Datos promedio de los resultados obtenidos en la prueba de validación #4.

<b>Usuario</b>	<b>Montaje (segundos)</b>	<b>Desmontaje (segundos)</b>
Usuario 1 (Niño 9 años)	25	27
Usuario 2 (Niño 11 años)	25	25
Usuario 3 (Adulto 1)	21	21
Usuario 4 (Adulto 2)	20	20
Usuario 5 (Adulto 3)	21	21

Todos los individuos completaron el proceso en menos de 30 segundos, lo que demuestra la facilidad de uso del diseño y su accesibilidad; incluso a usuarios de edades tempranas. Es decir, que el diseño es viable para su uso en un entorno de educación y con poca capacitación.

#### 5.1.5 Prueba de validación #5

Como quinta prueba de validación, se evaluó la vida útil del sujetador del marcador. Aunque no fue posible realizar 675 ciclos de montaje y desmontaje debido al tiempo limitado de desarrollo del proyecto, se pudo establecer un estimado razonable. Durante aproximadamente 15 días de validación del robot, se registró que el marcador fue colocado y descolocado al menos 6 veces al día. Es decir 90 ciclos de montaje y desmontaje, aproximadamente.

A lo largo de este período, no se observó ningún signo de desgaste en el soporte del marcador, lo que sugiere que el diseño es robusto y resistente al uso repetido. Esta evidencia indica que el sistema es confiable y está diseñado para soportar un uso intensivo sin comprometer su funcionalidad.

### 5.1.6 Prueba de validación #6

En la sexta prueba de validación, se asignó a 6 usuarios, maestras tanto de primaria como de secundaria, la tarea de desmontar el chasis del Atta-Bot STEM en sus tres principales piezas, simulando así un procedimiento de mantenimiento. El objetivo era evaluar la facilidad y rapidez con la que se pueden realizar estas tareas de mantenimiento.

Cabe destacar que, para obtener una potencia estadística del 80% se habría requerido una muestra de 11 personas. No obstante, se seleccionó una muestra basada en la disponibilidad de expertos en el área educativa, ya que en esta prueba no solo se evaluó el desmontaje del chasis, sino que también se capacitó brevemente a cada usuario para garantizar la correcta ejecución del procedimiento de mantenimiento. Por lo tanto, el tamaño de la muestra aplicada es justificable.

A continuación, se presentan los tiempos que tardaron los usuarios en completar el desmontaje del chasis, tabla 18.

Tabla 18. Resumen de los resultados obtenidos en la prueba de validación #6.

Usuario	Desmontaje (minutos)
1	4
2	4.45
3	4.57
4	4.3
5	4.5
6	5

En conclusión, esta validación refleja que todos los usuarios completaron la tarea dentro de los 5 minutos, lo que evidencia que el diseño del chasis facilita un acceso rápido y sencillo a sus componentes. Esta capacidad para realizar un mantenimiento eficaz contribuye a la sostenibilidad y operatividad del Atta-Bot STEM en el tiempo.

## 5.2 Rúbrica

El objetivo 4 utiliza como indicador una rúbrica diseñada específicamente para evaluar el prototipo funcional y verificar que cumpla con el 90% de los criterios técnicos definidos como indispensables para los investigadores del proyecto Atta-Bot STEM.

La rúbrica presentada en la Tabla 19 fue elaborada con el apoyo de un especialista en evaluación, quien colaboró en la revisión de su estructura. Con base en los resultados descritos en las secciones previas y la evaluación realizada por el cliente, se alcanzó un cumplimiento ideal del 85.71% de los requisitos indispensables, y el 14.29% restante fue evaluado como aceptable. Cabe destacar que ninguna de las necesidades fue clasificada por el cliente ni por los resultados de las validaciones como insuficiente.

Las necesidades primarias que abarcan los requisitos indispensables son: el SD cuenta con un chasis modular y robusto, es estable y tiene un rendimiento óptimo, dispone de una herramienta resistente y es preciso en sus movimientos. Entre estas características, la estabilidad y el rendimiento fueron considerados aceptables por el cliente.

Al detallar estos puntos, estas necesidades primarias comprenden siete requisitos indispensables, de los cuales seis fueron clasificados por el cliente como ideales. Específicamente, aunque el robot no presenta vuelcos en sus movimientos, el cliente considera aceptable que su uso y validación estén limitados a una superficie plana o sin relieves.

Además, se observa que la primera necesidad primaria, la estabilidad y rendimiento óptimo, se compone de dos necesidades secundarias: un chasis y/o control que mejore la estabilidad y el rendimiento del Atta-Bot STEM y, en segundo lugar, un chasis y/o control que minimice el riesgo de vuelcos durante el movimiento. Esto significa que, en valores absolutos, una de estas necesidades se cumple de forma ideal, y la otra se considera aceptable.

En conclusión, el análisis de los resultados demuestra que el rediseño del Atta-Bot STEM mejora significativamente en términos estructurales y de control, haciéndolo apto para entornos de alta manipulación. Además de cumplir con las expectativas de los clientes, quienes son especialistas en educación y enseñanza, este diseño aporta precisión y robustez, permitiendo su uso en diversas aplicaciones pedagógicas. Por ejemplo, su precisión lo hace adecuado para actividades de orientación espacial, en las que los usuarios, especialmente niños, pueden recorrer un mapa

mediante comandos, asociando conceptos como izquierda, derecha, adelante y atrás de forma interactiva. En el ámbito de la geometría, podría utilizarse para dibujar formas básicas, como triángulos y cuadrados, lo que facilita la comprensión de conceptos geométricos incluso desde edades tempranas. A esto se suma que los niños que hagan uso del Atta-Bot STEM puedan aprender conceptos de manera lúdica y concreta través de la manipulación del robot.

Tabla 19. Rúbrica de evaluación según métricas cumplidas o no cumplidas.

Criterios de cumplimiento	Niveles de cumplimiento		
	Ideal	Aceptable	Insuficiente
<b>Necesidades</b>	Cumple con todas la métricas en su valor ideal	Las métricas están por debajo del valor ideal pero dentro del rango del valor marginal.	Las métricas están por debajo del valor marginal
El SD tiene un chasis modular y robusto	x		
El SD se transporta con facilidad	x		
El SD es estable y con un rendimiento óptimo		x	
EL SD permite un fácil mantenimiento		x	
El SD posee una herramienta de fácil uso para el usuario		x	
El SD tiene una herramienta robusta	x		
El SD es preciso en sus movimientos	x		

### 5.3 Análisis económico

El análisis económico del proyecto incluyó una revisión detallada de todos los factores financieros implicados en el rediseño del Atta-Bot STEM, cubriendo desde los precios de cada componente hasta los costos de recursos como software, computadoras y otros insumos. En esta evaluación también se consideraron los costos de mano de obra, incluyendo el salario del diseñador, y todos estos elementos se consolidan en la Tabla 20, que estima un costo total de desarrollo del proyecto de aproximadamente \$2431.

Focalizándose únicamente en el costo de los componentes necesarios para la fabricación de una unidad sin incluir mano de obra, se observa que el costo total de la versión actual asciende a \$179. Aunque este valor representa un ligero incremento respecto al diseño previo, cuyo costo era de \$175, este rediseño resulta rentable no solo en términos financieros, sino también en el valor añadido que aporta.

El Atta-Bot se presenta como una opción más atractiva que el Beebot y el LEGO Mindstorms. A pesar de que el Beebot tiene un costo de \$100 y está limitado a giros de 90 grados sin capacidad para realizar actividades de dibujo [41], el Atta-Bot STEM ofrece funcionalidades que permiten a los estudiantes explorar conceptos más avanzados en programación y diseño. La incorporación de un marcador en el Atta-Bot STEM habilita actividades educativas que fomentan la creatividad y el aprendizaje práctico, ampliando sus aplicaciones en el aula.

En comparación, aunque existen sistemas como LEGO Mindstorms que ofrecen un enfoque educativo orientado a la construcción de robots programables, su costo es significativamente mayor, alcanzando los \$800, y su disponibilidad en el mercado es cada vez menor debido a la decisión de LEGO de reducir su producción [42]. Mientras estos sistemas pueden ser ideales para explorar aspectos técnicos, el Atta-Bot STEM se adapta de manera sobresaliente a entornos educativos donde el aprendizaje práctico y visual es fundamental. Su capacidad para realizar dibujos facilita una integración fluida en actividades pedagógicas, permitiendo la enseñanza de conceptos matemáticos y geométricos de forma accesible y atractiva.

La evaluación económica también revela que, aunque el costo unitario ha aumentado ligeramente, las mejoras funcionales y estructurales justifican esta inversión. El diseño modular y ligero no solo mejora su funcionalidad, sino que también facilita el mantenimiento y las futuras actualizaciones, lo que resulta en una reducción de costos a largo plazo al minimizar la necesidad de reparaciones o reemplazos frecuentes.

Además, el uso de materiales de bajo costo pero de alta resistencia asegura la longevidad del Atta-Bot STEM, lo que es fundamental en entornos escolares. La estructura resistente y las esquinas redondeadas del chasis priorizan la seguridad de los estudiantes y la integridad de los componentes, optimizando así el equilibrio entre costo y funcionalidad.

En conjunto, estos elementos no solo optimizan el valor económico del Atta-Bot, sino que también aseguran un retorno adecuado de la inversión inicial, destacando su utilidad y durabilidad en el contexto educativo. Por lo tanto, el Atta-Bot STEM se posiciona como una opción rentable y versátil en comparación con otras alternativas en el mercado.

Tabla 20. Análisis económico del proyecto.

<b>Categoría</b>	<b>Elemento</b>	<b>Costo en \$USD</b>
<b>Componentes</b>	Motor CD con encoder	\$29.90
	Batería Lipo	\$17.95
	Boost Battery Manager	\$10.95
	Soporte Motor	\$1.25
	Ball Caster	\$2.75
	IdeaBoard	\$39.95
	Servomotor	\$6.95
	Infrarrojo delantero	\$8.85
	Infrarrojo inferior	\$3.90
	Interruptor general	\$1.25
	Kit de conectores	\$8.95
	Kits de espaciadores	\$15.95
	Cable	\$3.95
	STEMMA QT cable	\$1.49
	Impresion 3D + PETG	\$18.00
	Corte laser + PMMA	\$7
	<b>Subtotal Componentes</b>	
<b>Salario del investigador</b>	Salario por hora	\$4.6
	Horas trabajadas por semana	20
	Semanas del proyecto	16
<b>Total Salario</b>		<b>\$1,472</b>
<b>Activos utilizados</b>	Software SolidWorks	\$50.00
	Software Matlab	\$50.00
	Computadora portátil	\$680.00
<b>Subtotal Activos</b>		<b>\$780.00</b>
<b>Total General</b>		<b>\$2,431.04</b>

## Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

- Con base en los criterios del proyecto Atta-Bot STEM, el análisis realizado sobre el estado de la primera versión del robot permitió identificar áreas de mejora técnica. Este diagnóstico resultó en una evaluación precisa que cumplió proporcionando una base sólida para las optimizaciones del diseño.
- El nuevo chasis diseñado supera el factor de seguridad esperado, con un valor superior a dos, y cuenta con una resistencia verificada mediante simulación que cumple con la protección IK8, garantizando así su durabilidad en entornos de alta manipulación. Su diseño también facilita la integración de herramientas educativas, consolidando su idoneidad como robot para actividades educativas.
- El nuevo algoritmo de control mejora significativamente la precisión del movimiento, logrando un sobreimpulso inferior al 3% (específicamente 0.68%) y un error de estado estacionario menor al 4%. Ninguna de las pruebas registró un error superior al 0.8%, cumpliendo así con los límites esperados y superando las expectativas establecidas. Esto asegura un control de movimiento confiable y ajustado a los requerimientos del proyecto. A la vez, añade confiabilidad para su uso en aulas.
- La validación del prototipo funcional demostró que este cumple satisfactoriamente con más del 85% de las necesidades indispensables, de acuerdo con la rúbrica de evaluación aplicada al cliente. Además, todos los requisitos alcanzan los valores ideales establecidos para cada métrica, destacando una capacidad adicional que potencia su funcionalidad sin afectar el rendimiento ni la compatibilidad con el software. El prototipo no solo cumple con los estándares definidos, sino que se alinea plenamente con los objetivos educativos del proyecto Atta-Bot STEM, superando las expectativas del cliente.

## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar una calibración manual del factor de corrección por inercia en los motores al ensamblarlos por primera vez, siguiendo el breve proceso explicado en este documento. Alternativamente, en el futuro, se podría integrar un código de secuencia para automatizar esta calibración.
- Al ser una pieza modular, el sujetador del marcador tiene el potencial de ampliar el espectro de marcadores compatibles en el futuro. Esto se podría lograr mediante la generación de múltiples piezas con diferentes diámetros, permitiendo así que se utilicen marcadores de diversos tamaños sin limitarse únicamente a aquellos de un diámetro específico.
- Se recomienda y se recuerda que todas las validaciones del robot en cuanto a precisión y movimientos se llevaron a cabo en un entorno donde la superficie es completamente plana. Por lo tanto, se sugiere que su uso se realice en condiciones lo más similares posibles. Durante las validaciones, se observó que incluso al colocar un cartón plano sobre un suelo con marcas de cisa, persistía un desnivel que afectaba las precisiones afirmadas en este proyecto.

## Bibliografía

- [1] Ministerio de Educación Pública de Costa Rica, “Programa Nacional de Formación Tecnológica es una realidad en las aulas costarricenses”, Octubre, 2024., Disponible en: <https://www.mep.go.cr/noticias/programa-nacional-formacion-tecnologica-realidad-aulas-costarricenses>
- [2] Molina, L., “Estudiantes deberán aprobar “nueva asignatura” sobre tecnología, anuncia MEP”, Seminario Universidad, Octubre,2024., Disponible en: <https://semanariouniversidad.com/pais/estudiantes-deberan-aprobar-nueva-asignatura-sobre-tecnologia-anuncia-mep/>
- [3] Molina, L., “Microsoft pagó viaje de directora del MEP que detuvo compras de robótica para cambiar a sus licencias” Seminario Universidad, Octubre,2024., Disponible en: <https://semanariouniversidad.com/pais/microsoft-pago-viaje-de-directora-del-mep-que-detuvo-compras-de-robotica-para-cambiar-a-sus-licencias/>
- [4] Ulrich, K & Eppinger, S, “Diseño y desarrollo de productos”, 5 ed. México, D.F., McGrawHill, 2013.
- [5] Jordan, J., “The Czech Play That Gave Us the Word ‘Robot’”, The MIT PRESS Reader, Octubre,2024., Disponible en: <https://thereader.mitpress.mit.edu/origin-word-robot-rur/>
- [6] “Robotics — Vocabulary”, in ISO Std ISO 8373:2021, 2021
- [7] “Standard Terminology for Evaluating Response Robot Capabilities”, in ATSM Std E2521 – 24, 2024
- [8] "IEEE Standard Ontologies for Robotics and Automation", in IEEE Std 1872-2015, 2015
- [9] Sujatha P V, “Introduction to Robotics”, en International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT) Volume 4, Issue 3, April 2021, Disponible en: <https://ijarsct.co.in/ICISSET007.pdf>
- [10] Gayatri M. Ghodke1 & Nilima Prakash Jajoo, “Latest Innovation in Robotics”, in International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT) Volume 4, Issue 2, March 2024, Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/378993803\\_Latest\\_Innovation\\_in\\_Robotics](https://www.researchgate.net/publication/378993803_Latest_Innovation_in_Robotics)
- [11] Giuseppe Fragapanea, René de Koster, Fabio Sgarbossa, Jan Ola Strandhagen, “Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda”, en European Journal of Operational Research Volume 294, Issue 2, 16 October 2021, Pages 405-426, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221721000217?via%3Dihub>
- [12] ScienceDirect, “Automated Guided Vehicle In subject area: Engineering”, Octubre, 2024., Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/automated-guided-vehicle>

- [13] Intel, “Types of Robots: How Robotics Technologies Are Shaping Today’s World”, Octubre,2024., Disponible en: <https://www.intel.com/content/www/us/en/robotics/types-and-applications.html>
- [14] Francisco Rubio, Francisco Valero & Carlos Llopis-Albert, “A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications”, en *International Journal of Advanced Robotic Systems* March-April 2019: 1–22, Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1729881419839596>
- [15] Universal Robots, “Robotic Arm Design”, Octubre,2024., Disponible en: <https://www.universal-robots.com/in/blog/robotic-arm-design/>
- [16] Jiangcheng Zeng, “The Development Trend of Robots”, en *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*, volume 631, 2022, Disponible en: <https://www.atlantispress.com/proceedings/sdmc-21/125968485>
- [17] Mayo Clinic, “Cirugía robótica”, Octubre,2024., Disponible en: <https://www.mayoclinic.org/es/tests-procedures/robotic-surgery/about/pac-20394974>
- [18] R. Valeroa, Y.H. Ko, S. Chauhana, O. Schatloff, A. Sivaraman, R.F. Coelho, F. Ortega, K.J. Palmer, R. Sánchez-Salas, H. Davila, X. Cathelineau & V.R. Patel, “Cirugía robótica: Historia e impacto en la enseñanza”, en *Actas Urol Esp* vol.35 no.9 oct. 2011, Disponible en: [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0210-48062011000900006](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0210-48062011000900006)
- [19] Robotnik, “Robots para tareas de inspección y mantenimiento”, Octubre,2024., Disponible en: <https://robotnik.eu/es/robots-para-tareas-de-inspeccion-y-mantenimiento/>
- [20] Spatial Team, “Discover How Automotive Robots Are Used in Car Manufacturing”, Octubre,2024., Disponible en: <https://blog.spatial.com/automotive-robots>
- [21] Universal Robots, “Painless Palletizing”, Octubre.2024, Disponible en: <https://www.universal-robots.com/applications/palletizing/>
- [22] Elly A. Konijn & Johan F. Hoorn, “Robot tutor and pupils’ educational ability: Teaching the times tables”, en *Computers & Education* Volume 157, November 2020, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131520301688>
- [23] Molina, L., “Más de 900 escolares aprendieron robótica con proyecto “Titibots”, Universidad de Costa Rica, Octubre,2024., Disponible en: <https://www.proinnova.ucr.ac.cr/noticias/ms-de-900-escolares-aprendieron-robotica-con-proyecto-titibots>
- [24] Ministerio de Educación Pública de Costa Rica, “Robótica Educativa”, Octubre,2024., Disponible en: <https://drea.mep.go.cr/robotica-educativa>
- [25] Villalobos,L., “Rediseño del robot móvil Atta-Bot para actividades de educación en colegios públicos.”, Lic. tesis, Escuela de Ingeniería en Mecatrónica., ITCR., Cartago, Cartago, 2024.

- [26] “Grados de protección proporcionados por las envolventes de materiales eléctricos contra los impactos mecánicos externos (código IK)”, en UNE-EN 50102, 2002
- [27] Smith, W. F., & Hashemi, J., “Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales”, 7.<sup>a</sup> ed., México, D.F., McGraw-Hill, 2023
- [28] Gómez F., Muñoz F., Florián B. E., Giraldo C. A. & Bacca-Cortes E. B., “Diseño y prueba de un robot móvil con tres niveles de complejidad para la experimentación en robótica”, en Ingeniería y Competitividad, Volumen 10, No. 2, p. 53 – 74, 2008, Disponible en: <https://biblat.unam.mx/hevila/IngenieriaYcompetitividad/2008/vol10/no2/4.pdf>
- [29] Ministerio de Educación Pública de Costa Rica, “Lineamientos sobre horarios para los diferentes ciclos, niveles, ofertas y modalidades del sistema educativo costarricense.”, 2016, Octubre,2024., Disponible en: [https://dgth.mep.go.cr/wp-content/uploads/2022/10/Lineamientos-de-Horarios-2016-VersiA%C2%B3n-final\\_compressed.pdf](https://dgth.mep.go.cr/wp-content/uploads/2022/10/Lineamientos-de-Horarios-2016-VersiA%C2%B3n-final_compressed.pdf)
- [30] Actuonix, “Miniature Linear Motion Series · L12”, RobotShop, Disponible en: <https://cdn.robotshop.com/media/F/Fir/RB-Fir-11/pdf/actuonix-l-12-datasheet.pdf>
- [31] RobotShop, “Actuonix L12 6V 50mm 210:1 PLC/RC Miniature Linear Actuator”, Octubre,2024., Disponible en: <https://ca.robotshop.com/products/actuonix-112-6v-50mm-2101-plc-rc-miniature-linear-actuator>
- [32] RobotShop, “DFRobot 18° Micro Stepper Motor for Arduino”, Octubre,2024., Disponible en: <https://ca.robotshop.com/products/dfrobot-18-micro-stepper-motor-arduino>
- [33] AFRC, “AFRC-D1015PRO Large-stroke 1.5g Super micro Digital Linear Servo”, Octubre,2024., Disponible en: <https://www.hk-afrc.com/products/afrc-d1015pro-large-stroke-15g-super-micro-digital-linear-servo>
- [34] SHENZHEN ZOHEN ELECTRIC APPLIANCES Co., Ltd., “ZH0-0420S-05A4.5 Specification”, SparkFun, Disponible en: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Robotics/ZHO-0420S-05A4.5%20SPECIFICATION.pdf>
- [35] Dorf, R. C., Bishop, R. H., “Sistemas de control moderno”, 10 ed., Madrid., España., Pearson Educación, 2005.
- [36] VectorNav, “Educational Material: 2.10 Feedback Controls”, Octubre,2024., Disponible en: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/math-fundamentals/math-controls>
- [37] Fernandez, G., “PI controller implementation for current control”, Octubre,2024., Disponible en: <https://imperix.com/doc/implementation/pi-controller>
- [38] Fadali, M. S., & Visioli, A., “State feedback control.”, en Digital Control Engineering, 2020, pp. 387–439, Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/338809240\\_State\\_feedback\\_control/citations](https://www.researchgate.net/publication/338809240_State_feedback_control/citations)

- [39] Moreno, L., Garrido, S., & Balaguer, C., “Apuntes de Control de Sistemas II”, Universidad Carlos Iii De Madrid, 2015, Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/272998772\\_Apuntes\\_de\\_Control\\_de\\_Sistemas\\_II#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/272998772_Apuntes_de_Control_de_Sistemas_II#fullTextFileContent)
- [40] Sain, D., “PID, I-PD and PD-PI controller design for the ball and beam system: A comparative study”, en IJCTA, 9(39), 2016, pp. 9-14, Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/312083564\\_PID\\_I-PD\\_and\\_PD-PI\\_controller\\_design\\_for\\_the\\_ball\\_and\\_beam\\_system\\_A\\_comparative\\_study](https://www.researchgate.net/publication/312083564_PID_I-PD_and_PD-PI_controller_design_for_the_ball_and_beam_system_A_comparative_study)
- [41] Hunsaker, E., “Bee-Bot A Guide for Parents and Educators”, Octubre,2024., Disponible en:  
[https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?filename=5&article=1007&context=ipt\\_projects&type=additional](https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?filename=5&article=1007&context=ipt_projects&type=additional)
- [42] LEGO, “LEGO MINDSTORMS EV3 User Guide” Octubre,2024., Disponible en:  
[https://www.lego.com/cdn/cs/set/assets/bltbef4d6ce0f40363c/LMSUser\\_Guide\\_LEGO\\_MINDSTORMS\\_EV3\\_11\\_Tablet\\_ENUS.pdf](https://www.lego.com/cdn/cs/set/assets/bltbef4d6ce0f40363c/LMSUser_Guide_LEGO_MINDSTORMS_EV3_11_Tablet_ENUS.pdf)
- [43] Mayku, “Thermoforming and 3D printing”, Octubre,2024., Disponible en:  
<https://mayku.me/learn/thermoforming-and-3d-printing>
- [44] Ye, R., “Acrylic CNC machining – Applications & Considerations”, en 3ERP, Octubre,2024., Disponible en: <https://www.3erp.com/blog/acrylic-machining/>
- [45] Science Direct, “Laser Cutting”, Octubre,2024., Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/laser-cutting>
- [46] Acar Yavuz G., Goren Kiral B., Katre S. & Atilla D., “Effects of Topology and Material on Mechanical Properties of Structures Produced by the Additive Manufacturing Method.”, en DEUFMD 23(69), 755-765, 2021, Disponible en  
[https://www.researchgate.net/publication/354697639\\_Effects\\_of\\_Topology\\_and\\_Material\\_on\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Structures\\_Produced\\_by\\_the\\_Additive\\_Manufacturing\\_Method#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/354697639_Effects_of_Topology_and_Material_on_Mechanical_Properties_of_Structures_Produced_by_the_Additive_Manufacturing_Method#fullTextFileContent)
- [47] Dassault Systems, “The Best Resins for 3D Printing”, Octubre,2024., Disponible en:  
<https://www.3ds.com/make/solutions/blog/best-resins-3d-printing>
- [48] Ali, Umar & Abd Karim, Khairil Juhanni & Buang, Nor., “A Review of the Properties and Applications of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA)”. en Polymer Reviews. 55. 1-28., 2015, Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/281211824\\_A\\_Review\\_of\\_the\\_Properties\\_and\\_Applications\\_of\\_Poly\\_Methyl\\_Methacrylate\\_PMMA/citations](https://www.researchgate.net/publication/281211824_A_Review_of_the_Properties_and_Applications_of_Poly_Methyl_Methacrylate_PMMA/citations)
- [49] Ansys Granta, “Materials property charts”, Octubre,2024., Disponible en:  
<https://www.grantadesign.com/education/students/charts/>
- [50] Organising Beautifully, “Stick on marker/pen holder”, Octubre,2024., Disponible en:  
<https://organisinglifebeautifully.com.au/products/adhesive-marker-pen-clip>

- [51]Primeart, “PRIME Universal Compass Adaptor”, Octubre,2024., Disponible en: <https://www.primeart.co.za/product/prime-universal-compass-adaptor/>
- [52] TyypBerlin, “Pen holder wall, wall pen holder made of metal self-adhesive”, Etsy, Octubre,2024., Disponible en: <https://www.etsy.com/uk/listing/966009933/stiftehalter-wand-wandstifthalter-aus>
- [53]MathWorks, “MATLAB”, Octubre,2024., Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html#:~:text=MATLAB%20es%20una%20plataforma%20de,desarrollar%20algoritmos%20y%20crear%20modelos>
- [54] Kumar, V., & Patra, A., “Application of Ziegler-Nichols method for tuning of PID controller”, en Internation Journal of Electric and Electronics Engineers, Vol. No. 8, Issue No. 2, July-December 2016., Disponible en: [http://www.arresearchpublication.com/images/shortpdf/1479279897\\_127ijeee.pdf](http://www.arresearchpublication.com/images/shortpdf/1479279897_127ijeee.pdf)
- [55] Castaño, S., “Todo sobre Ziegler Nichols – Sintonía de Control PID”, Octubre,2024., Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/ziegler-nichols-sintonia-de-control-pid/>

# Apéndices

Código:

[https://github.com/JMV0205/PFG\\_ATTABOT\\_STEM/tree/main/Entregables/Codigo/Total\\_Refactor\\_Final](https://github.com/JMV0205/PFG_ATTABOT_STEM/tree/main/Entregables/Codigo/Total_Refactor_Final)

Tabla 1. Medidas tomadas durante la validación de movimiento lineal.

Dato	Distancia (mm)				
	50	100	150	200	300
Experimental					
1	50.2	100.2	150.3	200.1	299.8
2	49.9	99.7	149.9	199.7	300.2
3	50	100.4	150.1	200.4	299.9
4	49.8	100.1	150.5	200	300.6
5	50.3	99.9	150	200.6	300.1
6	50.1	100.3	149.8	199.9	298.7
7	50	99.8	150.2	198.9	301
8	50.4	100.5	150.4	200.3	300.3
9	49.7	100	150	199.8	299.5
10	50.1	99.6	149.7	200.5	300.7
11	50.3	100.7	150.6	200.2	300.4
12	49.9	99.9	149.9	199.6	298.9
13	50.2	100.2	150.1	200	300.1
14	50	100	150.3	200.7	299.7
15	49.8	99.8	150.2	200.4	300.2
16	50.4	100.4	149.8	199.5	301.1
17	49.6	100.1	150	200.1	300
18	50	99.7	150.5	200.3	299.6
19	49.7	100.3	149.6	199.9	300.8
20	50.2	100.6	150.1	200.6	300.5
21	50.1	100	150.3	199.7	300.1
22	50.3	99.9	149.8	200.8	300.4
23	50	100.2	150.4	200	299.8
24	49.8	99.8	149.9	200.2	300.2
25	50.2	100.5	150.2	200.5	300.9
26	49.9	100.3	150.7	199.8	299.5
27	50.4	99.7	149.8	200.4	301
28	50	100.1	150	200.1	299.9
29	49.7	99.9	150.5	200.7	300.3
30	50.3	100.4	150.1	199.6	300.6
Promedio	50.0433	100.1	150.123	200.11	300.16
% Error	0.08667	0.1	0.08222	0.055	0.05333
Moda	50	99.9	150.1	200.1	300.2
Máximo	50.4	100.7	150.7	200.8	301.1
Mínimo	49.6	99.6	149.6	198.9	298.7
Desviación Estándar	0.23146	0.29595	0.28367	0.42778	0.57989

Tabla 2. Medidas tomadas durante la validación de movimiento angular

<b>Dato</b> <b>Experimental</b>	<b>Ángulo (°)</b>					
	<b>45</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>270</b>	<b>360</b>
1	44.5	89.5	120	180	270	363
2	45	90	119.5	179.5	269.5	363.5
3	45	90.5	120.5	180.5	270.5	362
4	44.5	90	119	179	270	363
5	45.5	89.5	120	180	269	364
6	45	90	119.5	179.5	270	363
7	44.5	90.5	120	180	270.5	360.5
8	45	89	120.5	180.5	269.5	363
9	45.5	90	119.5	179.5	270	363.5
10	45	89.5	120	180	269	362.5
11	44.5	90	119	179	270.5	363
12	45	90	120	180	270	360
13	44.5	89.5	120.5	180.5	269.5	363
14	45	90.5	119.5	179.5	270	364
15	45.5	90	120	180	270.5	363.5
16	45	89.5	120	180	270	363
17	44.5	90	119	179	269	363
18	45	89	120.5	180.5	270	362
19	45	90.5	120	180	270.5	363.5
20	45.5	90	119.5	179.5	269.5	363
21	44.5	89.5	120	180	270	364
22	45	90	120.5	180.5	270	362.5
23	45	90.5	119.5	179.5	269	363
24	45.5	89.5	120	180	270.5	363.5
25	45	90	120	180	270	360
26	44.5	90	119	179	269.5	363
27	45	89	120.5	180.5	270.5	364
28	45.5	90.5	120	180	270	363
29	44.5	89.5	119.5	179.5	269	362.5
30	45	90	120	180	270	363.5
Promedio	44.95	89.8667	119.85	179.85	269.867	362.833
% Error	0.11111	0.14815	0.125	0.08333	0.04938	0.78704
Moda	45	90	120	180	270	363
Máximo	45.5	90.5	120.5	180.5	270.5	364
Mínimo	44.5	89	119	179	269	360
Desviación Estándar	0.35598	0.45359	0.47616	0.47616	0.50742	1.04497

Tabla 3. Datos de Montaje del marcador al sujetador de la nueva herramienta.

Usuario	Montaje 1 (s)	Montaje 2 (s)	Montaje 3 (s)	Promedio Montaje (s)
Usuario 1 (Niño 9 años)	25.44	25.03	25.27	25
Usuario 2 (Niño 11 años)	25.27	24.88	24.07	25
Usuario 3 (Adulto 1)	21.85	21.68	20.84	21
Usuario 4 (Adulto 2)	19.47	19.34	20.15	20
Usuario 5 (Adulto 3)	21.53	21.59	20.91	21

Tabla 4. Datos de Montaje del marcador al sujetador de la nueva herramienta.

Usuario	Desmontaje 1 (s)	Desmontaje 2 (s)	Desmontaje 3 (s)	Promedio Desmontaje (s)
Usuario 1 (Niño 9 años)	27.51	25.7	27.52	27
Usuario 2 (Niño 11 años)	25.18	24.51	24.78	25
Usuario 3 (Adulto 1)	21.63	20.6	20.37	21
Usuario 4 (Adulto 2)	20.14	20.42	19.07	20
Usuario 5 (Adulto 3)	20.13	21.77	21.15	21

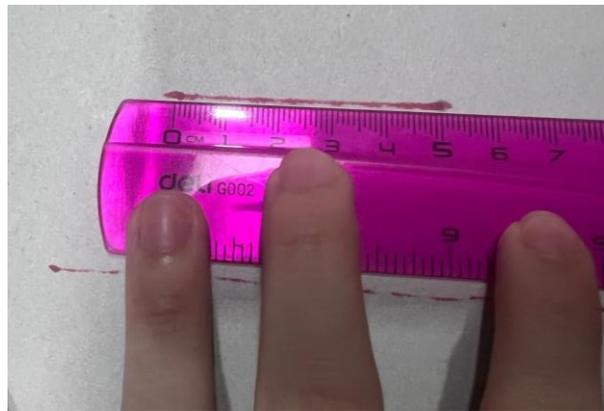


Figura 1. Prueba de validación de distancia de 50 mm.

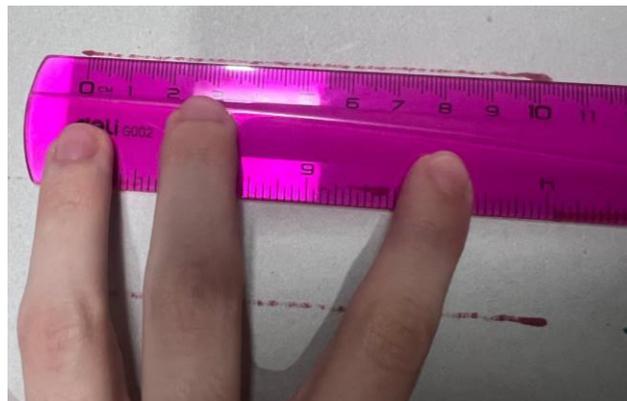


Figura 2. Prueba de validación de distancia 10 mm.



Figura 3. Prueba de validación de ángulo  $45^\circ$ .

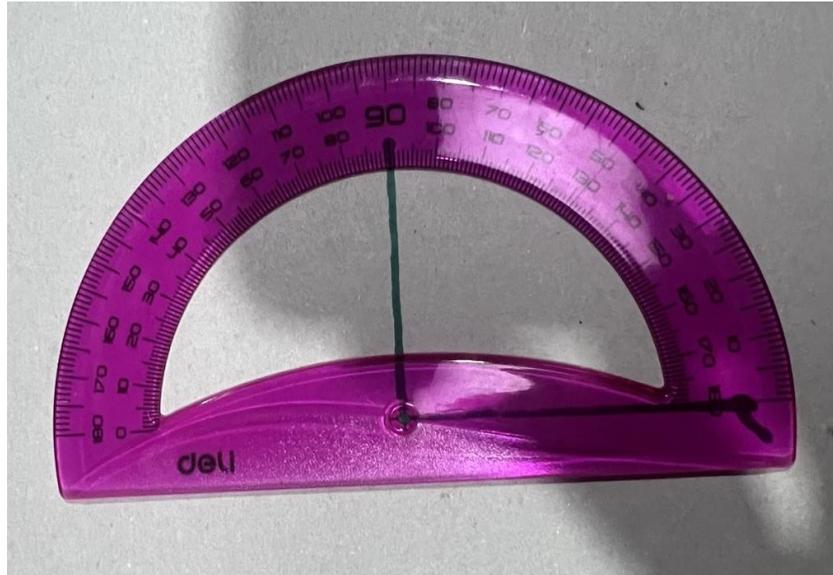


Figura 4. Prueba de validación de ángulo  $90^\circ$ .

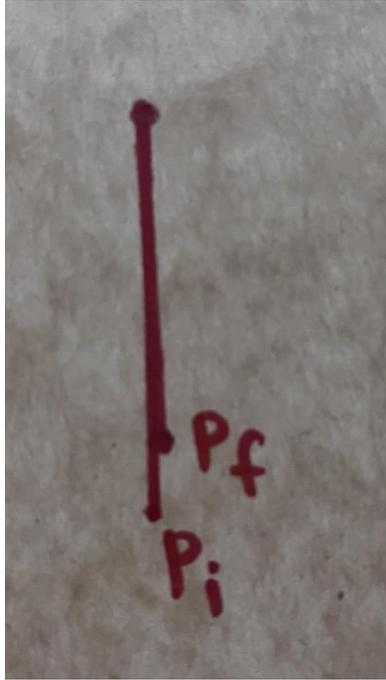


Figura 5. Prueba de validación de ángulo 180°.

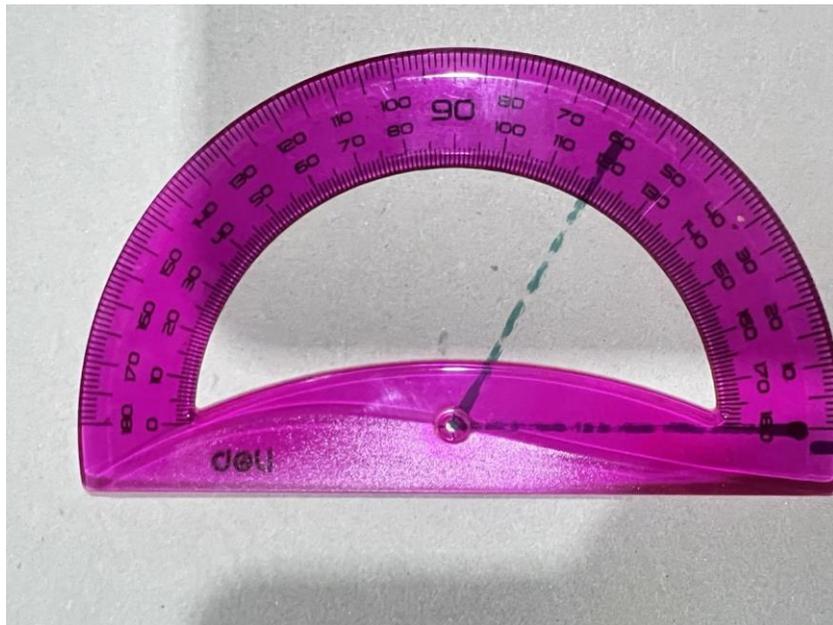
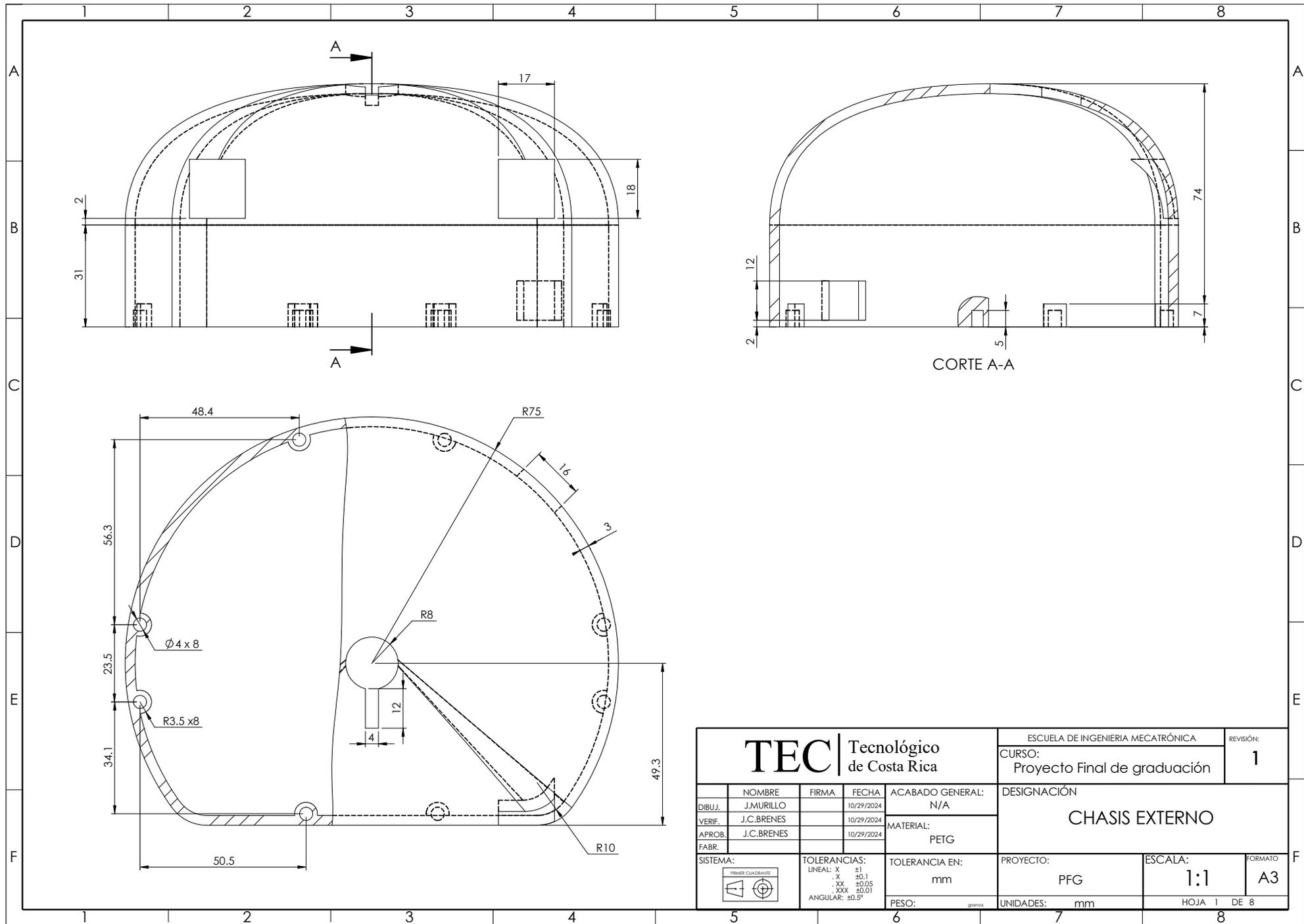


Figura 6. Prueba de validación de ángulo 120°.

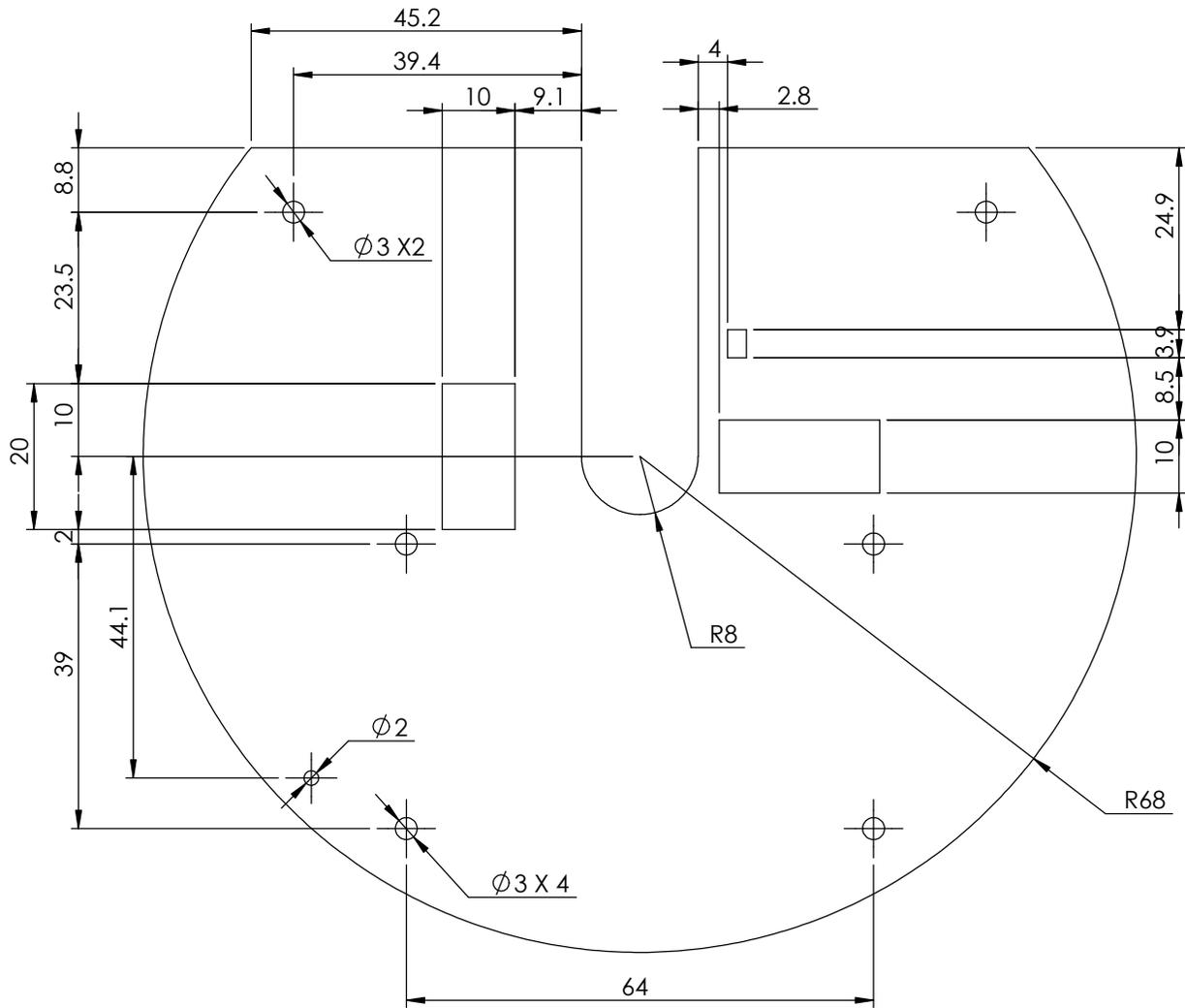


Figura 7. Prueba de validación de ángulo  $270^\circ$ .



CORTE A-A

<b>TEC</b> Tecnológico de Costa Rica				ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN:		
				CURSO: Proyecto Final de graduación		1		
DIBUJ. J.MURILLO VERIF. J.C.BRENES APROB. J.C.BRENES FABR.				ACABADO GENERAL: N/A		DESIGNACIÓN  <b>CHASIS EXTERNO</b>		
SISTEMA:				MATERIAL: PETG				
TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.1 .X ±0.05 .XX ±0.01 .XXX ±0.01 ANGULAR: ±0.5°				TOLERANCIA EN: mm		PROYECTO: PFG	ESCALA: 1:1	FORMATO A3
PESO:				UNIDADES: mm		HOJA 1 DE 8		



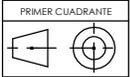
**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

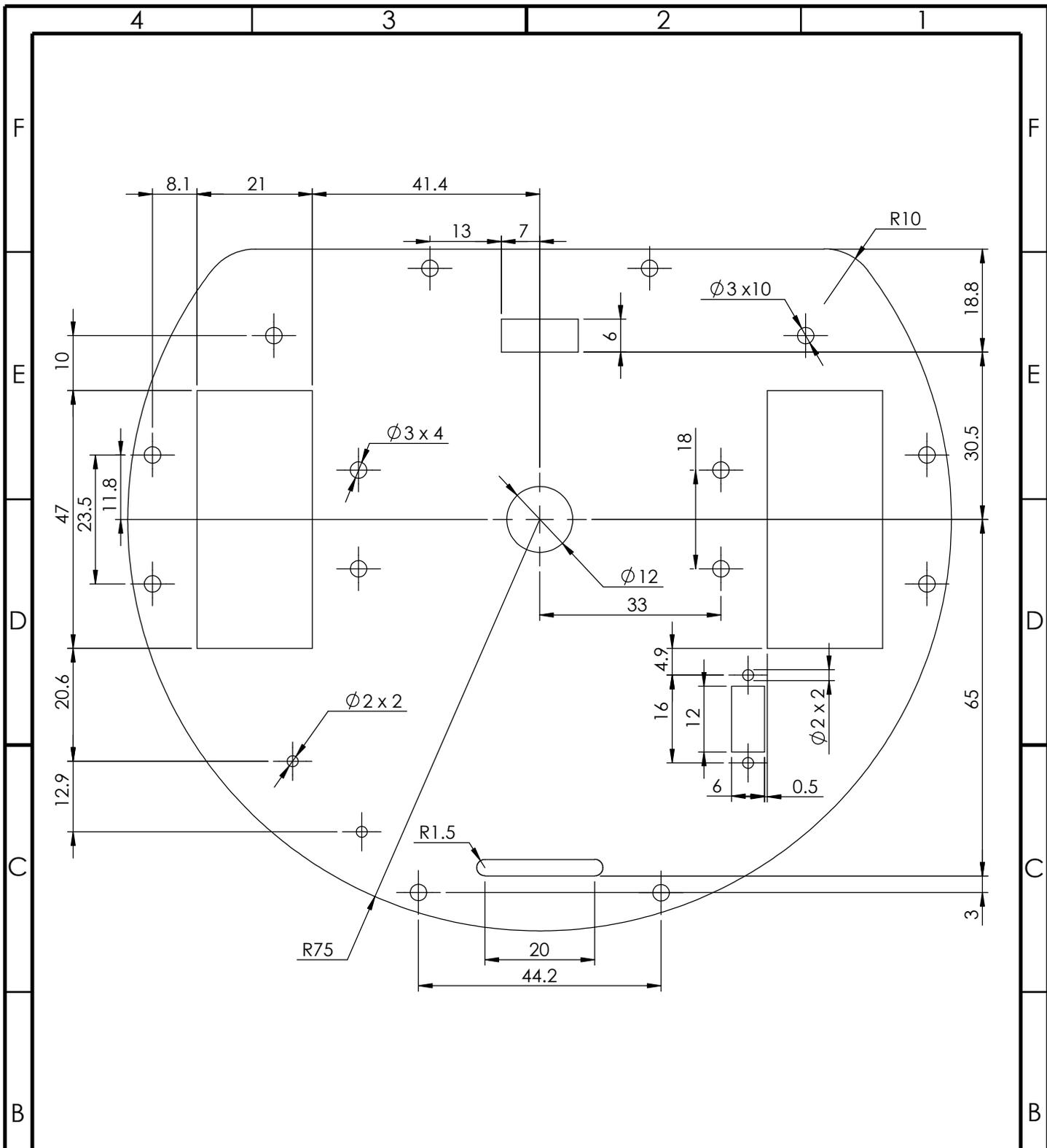
ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
Proyecto Final de Graduación

1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: N/A	DESIGNACIÓN		
DIBUJ.	J.MURILLO		10/29/2024	MATERIAL: PMMA - 3 mm	NIVEL SUPERIOR - CHASIS INTERNO		
VERIF.	J.C.BRENES		10/29/2024				
APROB. FABR.	J.C.BRENES		10/29/2024				
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: X ±1 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.01 ANGULAR: ±0.5°		mm	PFG	1:1	CARTA
PESO: <small>gramos</small>				UNIDADES: mm	HOJA 2 DE 8		



**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
Proyecto Final de Graduación

1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	J.MURILLO		10/29/2024	N/A
VERIF.	J.C.BRENES		10/29/2024	MATERIAL: PMMA - 3mm
APROB.	J.C.BRENES		10/29/2024	
FABR.				

DESIGNACIÓN  
**NIVEL INFERIOR - CHASIS INTERNO**

SISTEMA:

PRIMER CUADRANTE

TOLERANCIAS:  
LINEAL: X ±1  
.X ±0.1  
.XX ±0.05  
.XXX ±0.01  
ANGULAR: ±0.5°

TOLERANCIA EN:  
mm

PROYECTO:  
PFG

ESCALA:  
1:1

FORMATO  
CARTA

PESO: gramos

UNIDADES: mm

HOJA 3 DE 8

4

3

2

1

F

F

E

E

D

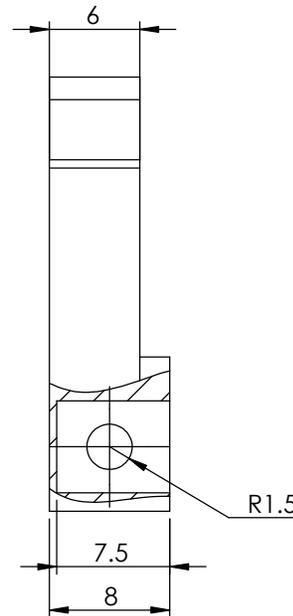
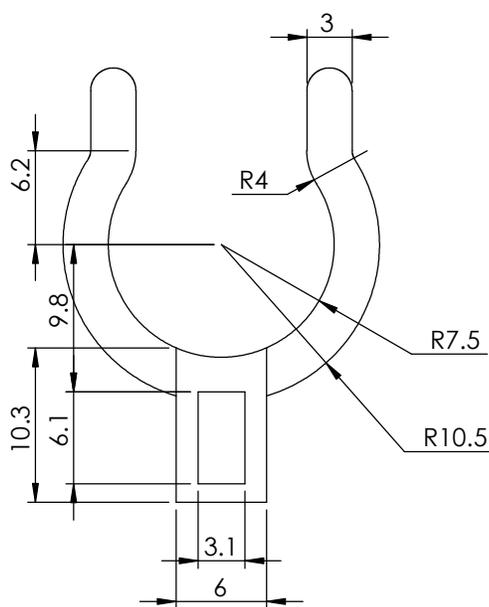
D

C

C

B

B



**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
Proyecto Final de Graduación

1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	J.MURILLO		10/29/2024	N/A
VERIF.	J.C.BRENES		10/29/2024	MATERIAL: PMMA - 3mm
APROB.	J.C.BRENES		10/29/2024	
FABR.				

DESIGNACIÓN
Sujetador - Herramienta

SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
PRIMER CUADRANTE 	LINEAL: X ±1 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.01 ANGULAR: ±0.5°	mm	PFG	2:1	CARTA
		PESO: <small>gramos</small>	UNIDADES: mm	HOJA 4 DE 8	

4 3 2 1

F

F

E

E

D

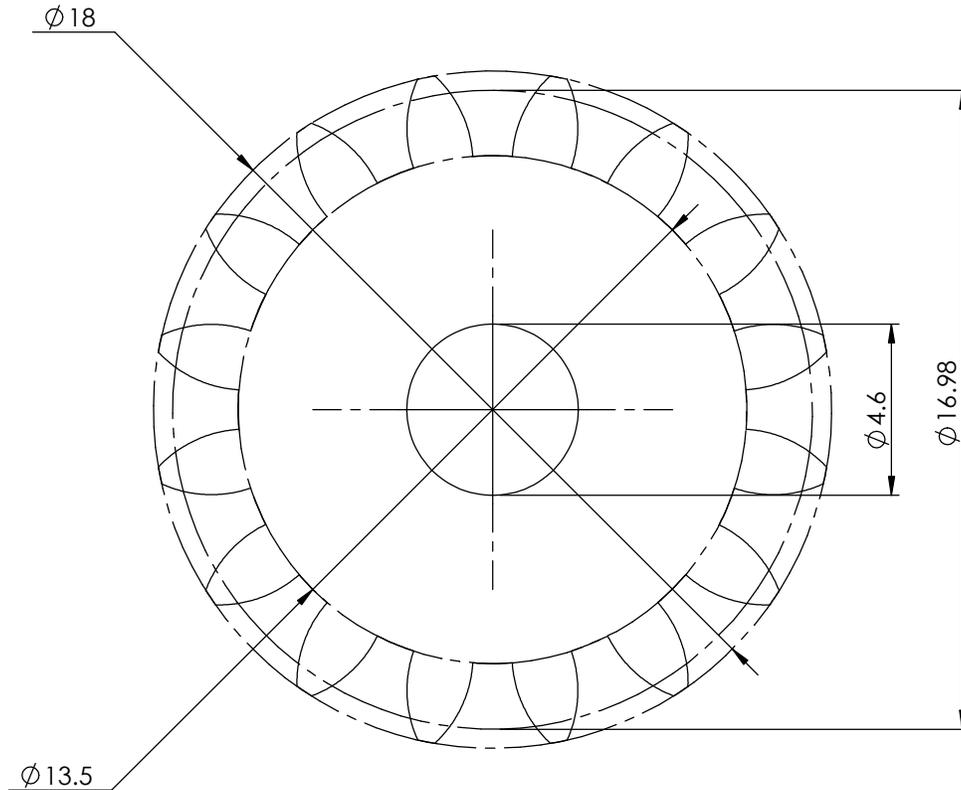
D

C

C

B

B



Dimensión	Valor
Diametro primitivo	16.98 mm
Diametro exterior	18 mm
Diametro interior	13,5 mm
Paso	3.4 mm
Módulo	1.06
Número de dientes	16

**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
Proyecto Final de Graduación

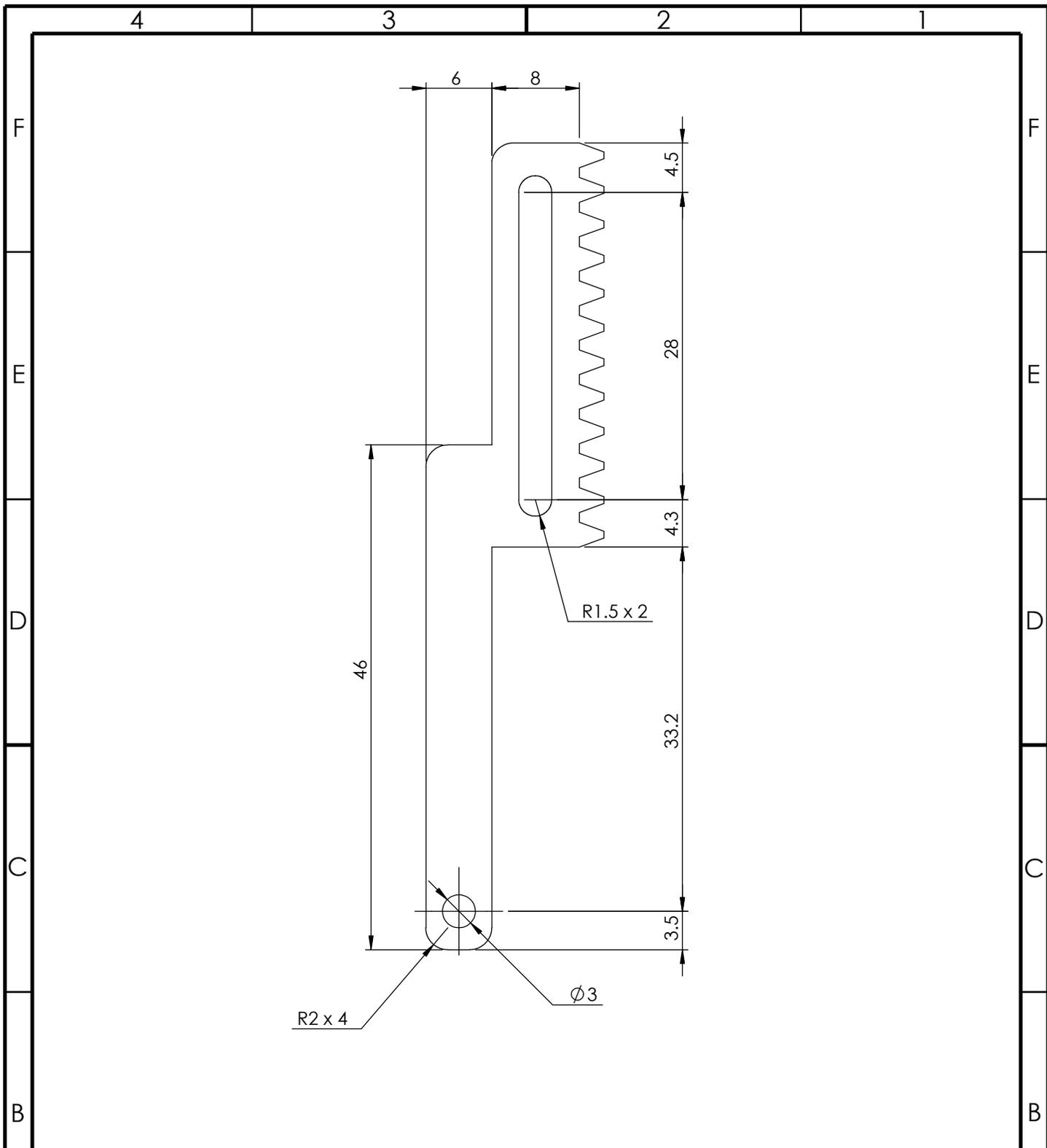
1

NOMBRE			FIRMA		FECHA		ACABADO GENERAL:		DESIGNACIÓN					
DIBUJ.	J.MURILLO				10/29/2024		N/A		Engrane - Herramienta					
VERIF.	J.C.BRENES				10/29/2024		MATERIAL:							
APROB.	J.C.BRENES				10/29/2024		PMMA - 3mm							
FABR.														
SISTEMA:			TOLERANCIAS:			TOLERANCIA EN:			PROYECTO:		ESCALA:		FORMATO	
			LINEAL: X ±1 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.01 ANGULAR: ±0.5°			mm			PFG		5:1		CARTA	
PESO:			UNIDADES:			gramos			mm		HOJA 5 DE 8			

A

A

4 3 2 1



**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
Proyecto Final de Graduación

**1**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	J.MURILLO		10/29/2024	N/A
VERIF.	J.C.BRENES		10/29/2024	MATERIAL: PMMA - 3mm
APROB.	J.C.BRENES		10/29/2024	
FABR.				

DESIGNACIÓN
Cremallera - Herramienta

SISTEMA:

PRIMER CUADRANTE

TOLERANCIAS:

LINEAL: X	±1
.X	±0.1
.XX	±0.05
.XXX	±0.01
ANGULAR: ±0.5°	

TOLERANCIA EN:

mm

PESO: gramos

PROYECTO:

PFG

UNIDADES: mm

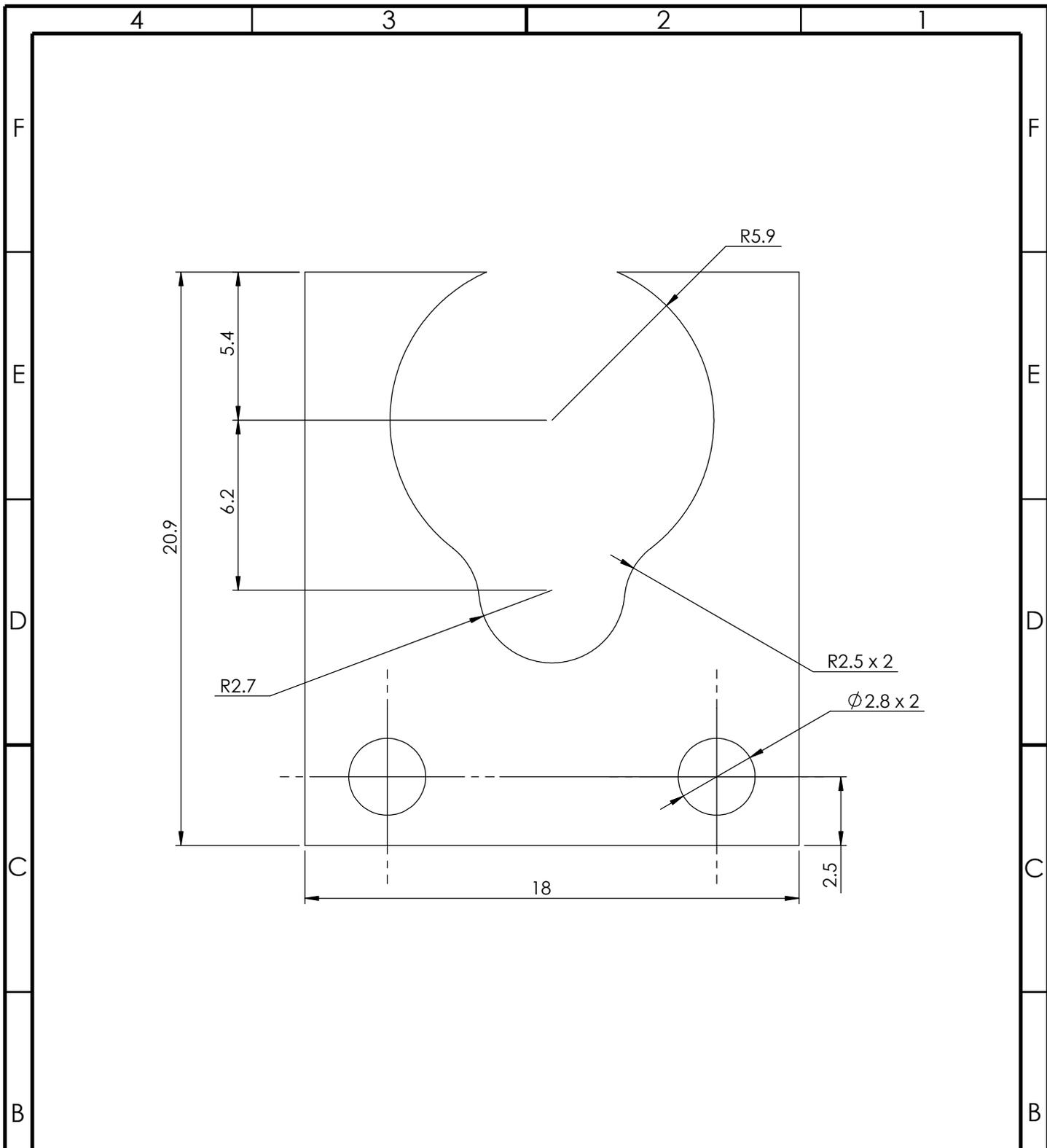
ESCALA:

**2:1**

HOJA 6 DE 8

FORMATO

CARTA



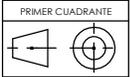
**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

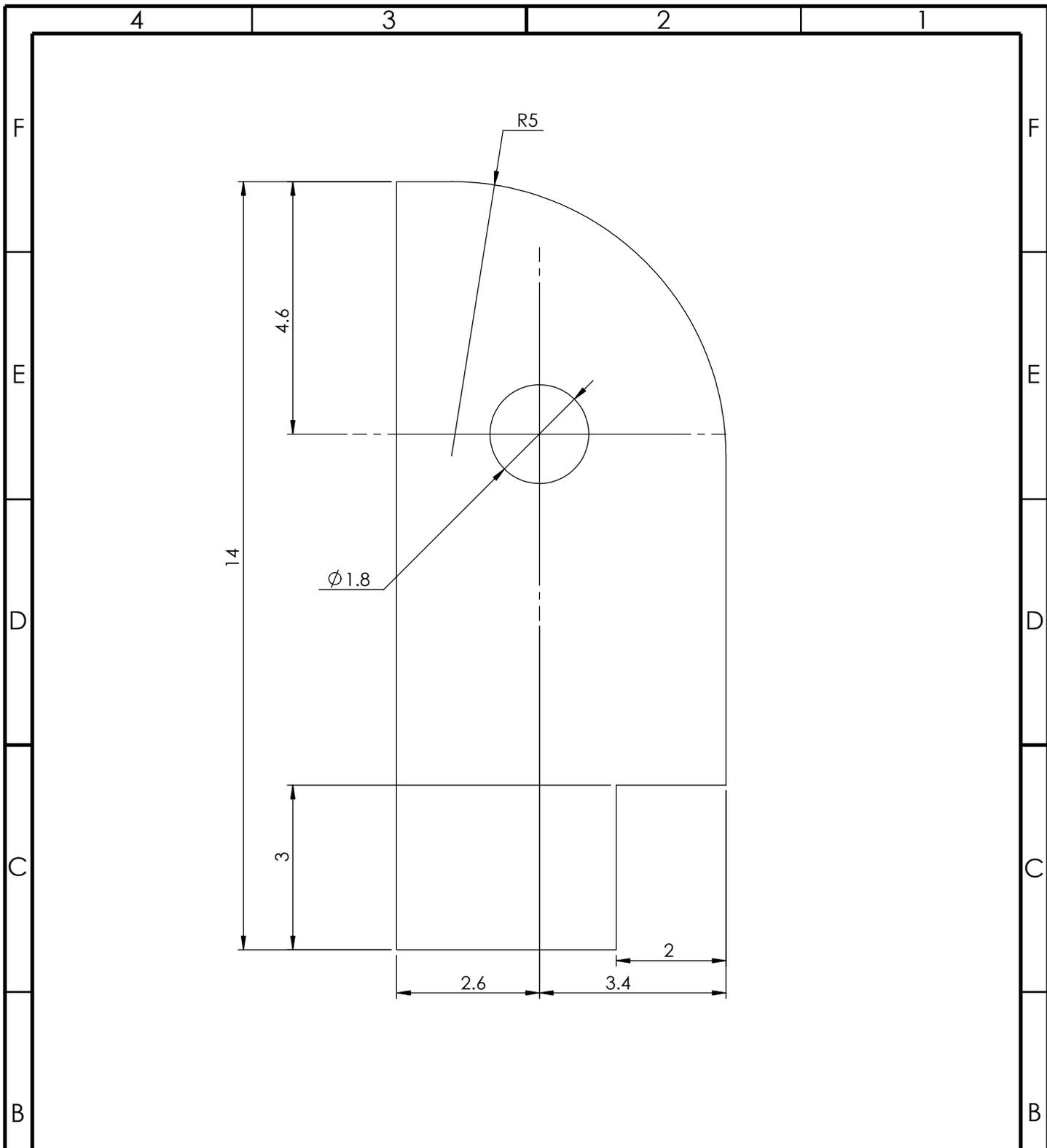
ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
Proyecto Final de Graduación

**1**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: N/A	DESIGNACIÓN		
DIBUJ.	J.MURILLO		10/29/2024	MATERIAL: PMMA - 3mm	Soporte - Herramienta		
VERIF.	J.C.BRENES		10/29/2024				
APROB.	J.C.BRENES		10/29/2024				
FABR.							
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: X ±1 X ±0.1 XX ±0.05 XXX ±0.01 ANGULAR: ±0.5°		mm	PFG	<b>5:1</b>	CARTA
PESO: <small>gramos</small>				UNIDADES: mm	HOJA 7 DE 8		



**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
Proyecto Final de Graduación

**1**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	J.MURILLO		10/29/2024	N/A
VERIF.	J.C.BRENES		10/29/2024	MATERIAL: PMMA - 3mm
APROB.	J.C.BRENES		10/29/2024	
FABR.				

DESIGNACIÓN  
**Soporte servomotor MG90S - Chasis**

SISTEMA: 	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±1 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.01 ANGULAR: ±0.5°	TOLERANCIA EN: <b>mm</b>	PROYECTO: <b>PFG</b>	ESCALA: <b>10:1</b>	FORMATO <b>CARTA</b>
PESO: <small>gramos</small>		UNIDADES: <b>mm</b>	HOJA <b>8</b> DE <b>8</b>		