

CARRERA DE ELECTRÓNICA

**"DESARROLLO DE UN ROBOT SEGUIDOR DE LÍNEA
AUTÓNOMO CON CONTROL PID, BLUETOOTH Y
OPTIMIZACIÓN DINÁMICA: INNOVACIÓN EN DISEÑO
3D Y SENSORES MULTIPLEXADOS"**

**Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del Título de
Tecnólogo Superior en Electrónica**

Autor: TAPIA VELÁSQUEZ JOSÉ IGNACIO

Tutor: ING. DIEGO CORDERO CHANGO

**MARZO, 2025
SANGOLQUÍ – ECUADOR**

Autor: TAPIA VELÁSQUEZ JOSÉ IGNACIO	Título a obtener: Tecnólogo Superior en Electrónica Matriz: Sangolquí -Ecuador Correo electrónico: jose.tapia@ister.edu.ec
	
Dirigido por: ING. DIEGO CORDERO CHANGO	Matriz: Sangolquí -Ecuador Correo electrónico: diego.cordero@ister.edu.ec
	

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

©2024 Tecnológico Universitario Rumiñahui

SANGOLQUÍ – ECUADOR

TAPIA VELÁSQUEZ JOSÉ IGNACIO

"Desarrollo de un Robot Seguidor de Línea Autónomo con Control PID, Bluetooth y Optimización Dinámica: Innovación en Diseño 3D y Sensores Multiplexados"

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación, presentado por **TAPIA VELÁSQUEZ JOSÉ IGNACIO** con CC: **1721275566**, para optar por el Título de Tecnólogo Superior en Electrónica; cuyo título es: "**Desarrollo de un Robot Seguidor de Línea Autónomo con Control PID, Bluetooth y Optimización Dinámica: Innovación en Diseño 3D y Sensores Multiplexados**", se considera que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador que fuere designado.

Sangolquí, a los 19 días del mes de marzo de 2025.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Diego Cordero', is written over a horizontal line.

Ing. Diego Cordero Chango
DOCENTE-TUTOR
C.I. 1721486882

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CT-ANX-2025-ISTER-2-2.2

Sangolquí, 26 de marzo del 2025

MSc. Elizabeth Ordoñez
DIRECTORA DE DOCENCIA

MSc. Mónica Loachamín
COORDINADORA DE TITULACIÓN

**INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE
UNIVERSITARIO**

Presente

Por medio de la presente, yo, **JOSÉ IGNACIO TAPIA VELÁSQUEZ** declaro y acepto en forma expresa lo siguiente: Ser autor del trabajo de titulación denominado **DESARROLLO DE UN ROBOT SEGUIDOR DE LÍNEA AUTÓNOMO CON CONTROL PID, BLUETOOTH Y OPTIMIZACIÓN DINÁMICA: INNOVACIÓN EN DISEÑO 3D Y SENSORES MULTIPLEXADOS**, de la Tecnología Superior **ELECTRÓNICA**; y a su vez manifiesto mi voluntad de ceder al Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui con condición de Universitario los derechos de reproducción, distribución y publicación de dicho trabajo de titulación, en cualquier formato y medio, con fines académicos y de investigación.

Esta cesión se otorga de manera no exclusiva y por un periodo indeterminado. Sin embargo, conservo los derechos morales sobre mi obra.

En fe de lo cual, firmo la presente.

Atentamente,



JOSÉ IGNACIO TAPIA VELÁSQUEZ
C.I.: 1721275566

FORMULARIO PARA ENTREGA DE PROYECTOS EN BIBLIOTECA INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE UNIVERSITARIO

CT-ANX-2025-ISTER-3

CARRERA:
TECNOLOGIA SUPERIOR EN ELECTRONICA

AUTOR /ES:
JOSÉ IGNACIO TAPIA VELÁSQUEZ

TUTOR (METODOLÓGICO Y ACADÉMICO):
DIEGO ARMANDO CORDERO CHANGO

CONTACTO ESTUDIANTE:
0982735306

CORREO ELECTRÓNICO:
nachotapia97@hotmail.com

TEMA:
DESARROLLO DE UN ROBOT SEGUIDOR DE LÍNEA AUTÓNOMO CON
CONTROL PID, BLUETOOTH Y OPTIMIZACIÓN DINÁMICA: INNOVACIÓN EN
DISEÑO 3D Y SENSORES MULTIPLEXADOS.

OPCIÓN DE TITULACIÓN:
PROYECTO DE INTEGRACION CURRICULAR.

RESUMEN EN ESPAÑOL:
El proyecto consiste en un robot seguidor de línea autónomo e innovador, equipado con una turbina configurable vía Bluetooth y un sistema de control PID. Utiliza sensores infrarrojos para detectar la línea, un microcontrolador (Arduino o ESC32) para procesar señales y motores DC para el movimiento. La turbina se controla con un servomotor o motor paso a paso.

La electrónica se integra en una PCB personalizada, optimizando precisión y eficiencia, mientras que el chasis, diseñado en Fusion 360 e impreso en 3D, asegura robustez y compactibilidad. El sistema se configura remotamente mediante la app Robo Remo, permitiendo ajustes dinámicos en entornos variables.

Este prototipo demuestra potencial en automatización industrial, destacando por su adaptabilidad, control PID para estabilidad y diseño modular.

PALABRAS CLAVE:

1. Seguidor-línea
2. Control-PID
3. Turbina-Bluetooth
4. PCB-personalizada
5. Chasis-3D

ABSTRACT:

This project presents the development of an autonomous line-following robot featuring PID control and a Bluetooth-configurable turbine. The system employs multiplexed infrared sensors, a microcontroller (Arduino/ESP32), and a custom PCB to optimize precision and efficiency. The 3D-printed chassis, designed in Fusion 360, integrates DC motors and a servo motor for turbine control. Remote configuration is enabled via a mobile app, highlighting its potential for industrial automation and as an educational tool in robotics. The prototype stands out for its adaptability in dynamic environments and its innovative approach to electromechanical integration, combining modular electronics, 3D printing, and real-time tunable control.

PALABRAS CLAVE:

1. Autonomy & PID Control – Self-correcting navigation.
2. Bluetooth Turbine – Adjustable settings via app (e.g., Robo Remo).
3. Custom Hardware – PCB + 3D-printed chassis for compact robustness.
4. Educational/Industrial Use – Demonstrates applied robotics and control systems.



Firma del Estudiante (AUTOR)
JOSE IGNACIO TAPIA VELASQUEZ
C.I.: 1721275566

SOLICITUD DE PUBLICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CT-ANX-2025-ISTER-4

Sangolquí, 26 de marzo del 2025

Sres.-

INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE UNIVERSITARIO

Presente

Yo, **JOSÉ IGNACIO TAPIA VELÁSQUEZ**, con C.I.: **1721275566** alumno de la Carrera **TECNOLOGO SUPERIOR EN ELECTRONICA**, cedo al INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO RUMIÑAHUI CON CONDICIÓN DE UNIVERSITARIO, los derechos de publicaciones del presente trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional para hacer uso de todos los contenidos con fines estrictamente académico o de investigación.

Atentamente,



Firma del Estudiante

JOSÉ IGNACIO TAPIA VELÁSQUEZ

C.I.: **1721275566**

DEDICATORIA

A mis padres, Wilfredo y Andrea
Que con todo mi amor y gratitud dedico este logro académico
porque han sido los pilares fundamentales de mi vida.
Con su amor, sacrificio y apoyo incondicional me enseñaron que
no hay sueño demasiado grande ni obstáculo imposible de superar.

A mi adorada hermana Tiare,
Le dedico este logro con todo mi cariño.
Su compañía, su alegría y su apoyo incondicional han sido un faro en mi camino.
Gracias por estar siempre ahí, por ser mi confidente y mi mejor amiga.

A mi querida tía Marta,
Su cariño, consejos y apoyo incondicional han sido un regalo invaluable en mi vida.
Gracias por estar siempre presente en los momentos importantes.

A mis queridos abuelitos Wilfredo y Venilda (Q.E.P.D.),
quienes estuvieron y me guiaron en mis primeros pasos.
Hoy desde el cielo celebran conmigo este logro.
Su amor y sabiduría siempre serán mi inspiración.
¡Gracias por estar presentes, incluso en la distancia eterna!

A mis amigos y compañeros de estudio,
con quienes compartí noches de desvelo, momentos de frustración,
pero también de triunfo y alegría.
Gracias por ser parte de esta travesía y por creer en mí.

A mis profesores y mentores,
quienes con su sabiduría y paciencia
me guiaron por el fascinante mundo de la electrónica,
inspirándome a superar mis límites y a perseguir la excelencia.

Y, finalmente, a mí mismo,
por no rendirme ante las dificultades,
por aprender de cada error y por crecer con cada desafío.

Este logro es un recordatorio de que,
con perseverancia y pasión, los sueños se convierten en realidad.
Que esta tesis sea el inicio de un camino lleno de innovación,
creatividad y contribuciones al mundo de la tecnología.

Este título no es solo un reconocimiento académico,
sino un tributo a todos aquellos que creyeron en mí
y me apoyaron incondicionalmente.

Con todo mi corazón,

José Ignacio Tapia Velásquez

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente mis padres Wilfredo y Andrea, mi hermana Tiare, mi tía Marta y a mis abuelitos Wilfredo y Venilda (Q.E.P.D.), que, siempre han contribuido y me han apoyado para que logre mis metas, especialmente en la realización de este proyecto y en la culminación de mi formación académica.

A Iracy,
quien siempre ha estado ahí dándome consejos y una extrema motivación disciplinaria, además de que siempre ha estado presente en los momentos importantes de mi vida.

A mi Gran Maestro de Artes Marciales, Christian Cruz
Por motivarme a ser un maestro marcial cinturón Negro en Taekwondo.
Gracias a ello y a los campeonatos ganados en competencias nacionales e internacionales, pude obtener una beca para continuar con mis estudios en esta prestigiosa institución.

A mis profesores y mentores,
por su guía, conocimientos y paciencia;
por su apoyo incondicional y motivación en cada etapa de este proceso.

A mis amigos y compañeros,
por su compañía, colaboración y momentos compartidos
que hicieron este camino más llevadero.

Este logro es el resultado de un esfuerzo colectivo,
y por eso, lo dedico a todos aquellos que creyeron
en mí y me inspiraron a seguir adelante.

Gracias, de todo corazón, por ser parte de esta historia.

Con profunda gratitud,

José Ignacio Tapia Velásquez

RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto consiste en el desarrollo e implementación de un robot seguidor de línea autónomo e innovador, equipado con una turbina configurable vía Bluetooth y un sistema de control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) que integra sensores multiplexados. Se diseñó una PCB personalizada, adaptable a un chasis impreso en 3D, para optimizar la precisión, eficiencia y adaptabilidad del robot en entornos dinámicos. Este prototipo demuestra su potencial en aplicaciones de automatización y robótica industrial, destacando por su capacidad para operar de manera autónoma y ajustarse a diferentes condiciones.

El robot utiliza sensores infrarrojos para detectar la línea, un microcontrolador como Arduino o ESC32 para procesar señales y controlar el sistema, y un módulo Bluetooth HC-05 que permite la configuración remota de la turbina. El movimiento es impulsado por motores DC, mientras que la turbina se controla mediante un servomotor o motor paso a paso. El control PID, implementado en el microcontrolador, ajusta dinámicamente el movimiento para garantizar precisión y estabilidad. Todos los componentes electrónicos se integran en una PCB de diseño personalizado, configurable mediante la aplicación Robo Remo, y el chasis, diseñado en CAD Fusion 360, se fabrica mediante impresión 3D, asegurando una estructura robusta y compacta que aloja eficientemente los elementos mecánicos y electrónicos.

Las pruebas realizadas demostraron que el robot es un prototipo completamente funcional, lo que quedó evidenciado durante su participación en el CONCURSO ROBOTICA KUNTABOT, celebrado en Santo Domingo de los Tsáchilas el 14 de marzo de 2025, donde obtuvo una destacada actuación. Esto confirmó que la integración de componentes y el ajuste remoto mediante Bluetooth son eficientes, posicionando al robot como una herramienta educativa innovadora. Facilita la comprensión de conceptos avanzados en electrónica, robótica y control automático, tanto para estudiantes como para entusiastas de la tecnología. Además, se generaron documentos técnicos, esquemas electrónicos, diseños de la PCB,

archivos STL para la impresión 3D del chasis y el código fuente del software, garantizando la replicabilidad y el acceso abierto al conocimiento generado durante el proyecto.

Este proyecto no solo impacta como una herramienta educativa, sino que también fomenta la innovación y el interés en la electrónica y la robótica, áreas de gran relevancia en la industria actual. Su enfoque en la automatización y la adaptabilidad lo convierte en un referente para futuros desarrollos tecnológicos, promoviendo la aplicación práctica de conceptos teóricos y contribuyendo al avance de la robótica en entornos académicos e industriales.

PALABRAS CLAVE

Palabras clave: robot seguidor de línea, turbina configurable por Bluetooth, control PID (Proporcional-Integral-Derivativo), microcontrolador (Arduino, ESP32), sensores infrarrojos, motores DC, servomotor, motor paso a paso, PCB personalizada, chasis 3D, impresión 3D, diseño CAD (Fusion 360), módulo Bluetooth (HC-05, HC-06), aplicación móvil, educación en electrónica, robótica, control automático, esquemas electrónicos, código fuente, y optimización, innovación en electrónica, herramienta didáctica, integración electromecánica, archivos STL.

ABSTRACT

The project involves the development and implementation of an innovative autonomous line-following robot, equipped with a Bluetooth-configurable turbine and a PID (Proportional-Integral-Derivative) control system that integrates multiplexed sensors. A custom-designed PCB, adaptable to a 3D-printed chassis, was created to optimize the robot's precision, efficiency, and adaptability in dynamic environments. This prototype demonstrates its potential in automation and industrial robotics applications, standing out for its ability to operate autonomously and adjust to varying conditions.

The robot uses infrared sensors to detect the line, a microcontroller such as Arduino or ESC32 to process signals and control the system, and an HC-05 Bluetooth module that allows remote configuration of the turbine. Movement is driven by DC motors, while the turbine is controlled by a servo motor or stepper motor. The PID control, implemented in the microcontroller, dynamically adjusts movement to ensure precision and stability. All electronic components are integrated into a custom-designed PCB, configurable via the Robo Remo application, and the chassis, designed in CAD Fusion 360, is manufactured using 3D printing, ensuring a robust and compact structure that efficiently houses the mechanical and electronic elements.

The tests conducted demonstrated that the robot is a fully functional prototype, as evidenced by its participation in the KUNTABOT ROBOTICS CONTEST held on Santo Domingo de los Tsáchilas, March 14, 2025, where it achieved an outstanding performance. This confirmed that the integration of components and remote adjustment via Bluetooth are efficient, positioning the robot as an innovative educational tool. It facilitates the understanding of advanced concepts in electronics, robotics, and automatic control, both for students and technology enthusiasts. Additionally, technical documents, electronic schematics, PCB designs, STL files for 3D printing the chassis, and the software source code

were generated, ensuring replicability and open access to the knowledge produced during the project.

This project not only impacts as an educational tool but also fosters innovation and interest in electronics and robotics, areas of great relevance in today's industry. Its focus on automation and adaptability makes it a benchmark for future technological developments, promoting the practical application of theoretical concepts and contributing to the advancement of robotics in academic and industrial environments.

KEYWORDS

Keywords: line-following robot, Bluetooth-configurable turbine, PID control (Proportional-Integral-Derivative), microcontroller (Arduino, ESP32), infrared sensors, DC motors, servo motor, stepper motor, custom PCB, 3D chassis, 3D printing, CAD design (Fusion 360), Bluetooth module (HC-05, HC-06), mobile application, electronics education, robotics, automatic control, electronic schematics, source code, user manual, testing and optimization, innovation in electronics, didactic tool, electro-mechanical integration, STL files.

ÍNDICE GENERAL

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS.	iii
APROBACIÓN DEL TUTOR	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN EJECUTIVO	vii
PALABRAS CLAVE	viii
ABSTRACT.....	ix
KEYWORDS.....	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Preguntas de directrices	3
1.3. Objetivo General.....	5
1.4. Objetivos Específicos.....	6
1.5. Justificación	6
1.6. Alcance	7
CAPÍTULO II	10
MARCO DE REFERENCIAS.....	10
2.1. Fundamento teórico relacionado al trabajo de integración curricular	10
2.1.1. Robot Autónomo Seguidor de Línea	10
2.1.2. Fundamento Teórico: Aspectos Físicos del Seguidor de Línea con Turbina	11
2.1.3. Importancia del Bajo Peso	11
2.1.4. Dimensiones del Seguidor de Línea	12
2.1.5. Diseño Esquemático de los Componentes	12
2.1.6. Chasis del Robot	13
2.1.7. Turbina de Succión	15
2.1.8. Material para la Ventosa	16
2.1.9. Sensores Multiplexados	17
2.1.10. Control PID (Proporcional-Integral-Derivativo)	19
2.1.11. Motores y Control PWM	19
2.1.12. Comunicación Bluetooth y RoboRemo	20
2.1.13. Almacenamiento e EEPROM	22

2.1.14. Placa PCB personalizada	23
2.1.15. Regulador de Voltaje 220	24
2.1.16. Batería Lipo 2S	25
2.1.17. Algoritmos de Optimización.....	25
2.1.18. Ensamblaje.....	25
CAPÍTULO III.....	27
MARCO METODOLÓGICO.....	27
3.1. El método científico.....	27
3.1.1. Tipos de investigación	36
3.1.2. Métodos teóricos de investigación.....	40
3.1.3. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	43
3.1.4. Tratamiento de la información.....	45
CAPÍTULO IV.....	46
DESARROLLO DEL PROYECTO TÉCNICO	46
4.1. Diseño de la propuesta.....	47
4.1.1. Diseño Esquemático de Componentes.....	47
4.1.2. Diseño del Chasis y Portamotores	48
4.1.3. Diseño Placa PCB	50
4.1.4. Comunicación Bluetooth	51
4.2. Implementación.....	51
4.2.1. Lógica de Control PID	51
4.2.2. Comunicación Bluetooth	53
4.2.3. Ensamblaje del Chasis	53
4.2.4. Conexiones Electrónicas.....	54
4.2.5. Códigos básicos para el control de la Turbina	54
4.2.6. Códigos básicos para manejar Multiplexación	55
4.2.7. Almacenamiento EEPROM	56
4.3. Pruebas.....	58
4.3.1. Pruebas de Funcionalidad	58
4.3.2. Pruebas de Durabilidad.....	59
4.3.3. Pruebas de Estabilidad	59
4.4. Resultados.....	59
CAPITULO V	61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
5.1. Conclusiones.....	61

5.2. Recomendaciones	63
5.3. Referencias.....	64
ANEXOS	1

Índice de Tablas

Tabla 1	Fórmula PID	52
Tabla 2	Implementación básica en código	53
Tabla 3	Código básico para controlar la turbina	54
Tabla 4	Código básico para manejar multiplexación	55
Tabla 5	Tabla de Verdad Sensores Multiplexados	56
Tabla 6	Guardado y lectura de valores en EEPROM	57

Índice de Figuras

Figura 1	Diseño Esquemático de Distribución de los Componentes	13
Figura 2	Modelo Chasis impreso en 3D con PLA	14
Figura 3	Llantas Minisumo	14
Figura 4	Impresora 3D	14
Figura 5	Turbina de Succión AEO Brushless	16
Figura 6	Diseño Pista de Seguidor de Línea	17
Figura 7	Regleta de 16 Sensores Reflectivos Multiplexados	18
Figura 8	Placa Arduino NANO V3.0 FTDI con Cable USB	18
Figura 9	Kit 40 Cables Arduino Macho-Hembra Dupont-Jumper	18
Figura 10	Modelo Esquema del Control PID	19
Figura 11	Controlador Dual de Motores Puente H	20
Figura 12	Controlador de Motor ESC Brushless BLHELI-S HSKRC	20
Figura 13	Logo de Aplicación Robo Remo	21
Figura 14	Modelo de Configuración y ajuste de los parámetros del Controlador PID (KP, KI, KD)	21
Figura 15	Módulo Bluetooth HC-05 para Arduino PIC.PC. ATME	22
Figura 16	Logo Aplicación EASYEDA	23
Figura 17	Modelo de Diseño de la Huella Placa PCB Personalizada en CAD	23
Figura 18	Espadines en Ángulo Macho	23
Figura 19	Espadines Rectos Macho	24
Figura 20	Espadines Rectos Hembra	24
Figura 21	Capacitor Cerámico	24
Figura 22	Interruptor Deslizable	24
Figura 23	Regulador de Voltaje 220	24
Figura 24	Batería Lipo 2S	25
Figura 25	Diseño Final Esquemático de Componentes	48
Figura 26	Diseño del Chasis en CAD Fusion 360	49
Figura 27	Chasis impreso en 3D con PLA	49
Figura 28	Portamotores impresos en 3D con PLA	49
Figura 29	Diseño Huella Placa PCB	50
Figura 30	Diseño de Placa PCB en 3D con Fusion 360	50
Figura 31	Placas PCB fabricadas	51
Figura 32	Implementación de Parámetros del Control PID	52
Figura 33	Componentes individuales del Robot Seguidor de Línea	57
Figura 34	Ensamble del Robot Seguidor de Línea	58

Lista de anexos

ANEXO 1. Cuadro Cronograma de Actividades del Proyecto

ANEXO 2. Cuadro Presupuesto detallado del Proyecto

INTRODUCCIÓN

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un seguidor de línea con turbina configurable mediante Bluetooth, controlado por un Arduino Nano. El sistema permite ajustar parámetros esenciales como las constantes del control PID, la velocidad de los motores, la fuerza de frenado y el control de la turbina utilizando la librería Servo en microsegundos. La comunicación inalámbrica se gestiona mediante el módulo Bluetooth HC-05 y la aplicación RoboRemo, lo que permite realizar configuraciones en tiempo real sin la necesidad de reprogramar el dispositivo.

El robot cuenta con una regleta de 16 sensores multiplexada, lo que aumenta la precisión en la detección de la línea y mejora la capacidad del sistema para realizar correcciones rápidas y eficaces. Los motores son controlados mediante el módulo TB6612FNG, que gestiona dos motores Pololu de 6V con una relación 10:1, permitiendo un control preciso del movimiento mediante PWM.

Para el suministro de energía, el sistema utiliza una batería LiPo 2S de 7.4V y 300mAh 75C, un módulo elevador de voltaje MT3608 y un regulador LM7805 para estabilizar las tensiones necesarias. Capacitores de filtro se emplean en cada módulo para reducir el ruido eléctrico, exceptuando el elevador de voltaje.

Este proyecto está dirigido a estudiantes de tecnología en electrónica y busca ofrecer una plataforma educativa integral. Los participantes podrán explorar conceptos fundamentales como el control PID, la gestión eficiente de motores, el uso de sensores multiplexados, la comunicación inalámbrica y el almacenamiento de configuraciones en la memoria EEPROM.

El uso de una turbina añade un reto adicional, incentivando la optimización del rendimiento en diversos escenarios de pista.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La innovación y la práctica son pilares fundamentales para el desarrollo de habilidades técnicas y creativas. En el ámbito de la educación en electrónica. Este dispositivo no solo busca ser una herramienta didáctica para estudiantes y entusiastas de la electrónica, sino también un ejemplo tangible de cómo la integración de tecnologías modernas puede resolver problemas complejos de manera eficiente. En este trabajo, se exploran los desafíos técnicos, las soluciones propuestas y el impacto educativo de un sistema que combina control automático, comunicación inalámbrica y diseño mecánico, sentando las bases para futuras aplicaciones en robótica y automatización.

1.1. Planteamiento del problema

Existe una creciente necesidad en el campo de la educación en electrónica y robótica de herramientas didácticas que permitan a los estudiantes comprender y aplicar conceptos avanzados de control automático, sistemas embebidos y comunicación inalámbrica en prototipos diseñados con distintos software para su fabricación. Sin embargo, muchos de los dispositivos disponibles en el mercado son costosos, de funcionalidad limitada o no permiten una personalización que facilite el aprendizaje práctico. Esto es un limitante para la capacidad de los estudiantes que buscan experimentar y profundizar en temas como el control PID (Proporcional-Integral-Derivativo), la configuración remota de dispositivos y la integración de sistemas mecánicos y electrónicos.

En la mayoría de los casos se deja de lado la implementación de proyectos integrales que simulen desafíos reales, centrándose en la enseñanza de la electrónica solo teóricamente. Esto genera una limitante a la hora de enfrentar problemas complejos en el ámbito de la

automatización y la robótica de los profesionales, creando una brecha entre el conocimiento teórico y las habilidades prácticas dificultando la formación de los mismos.

Ante esta problemática, surge la necesidad de desarrollar un sistema que combine accesibilidad, funcionalidad y versatilidad. Un seguidor de línea con turbina configurable vía Bluetooth, control PID, integrando placa PCB en diseños elaborados en 3D, representa una solución innovadora, que no solo permite a los estudiantes experimentar con el control de motores y sensores, sino también explorar la configuración remota de parámetros y la optimización de sistemas mediante algoritmos de control avanzados. Este proyecto busca responder a esta interrogante.

La respuesta a esta pregunta no solo contribuirá a la formación de estudiantes mejor preparados, sino que también promoverá el uso de tecnologías modernas en la educación, fomentando la innovación y el desarrollo de soluciones creativas en el campo de la electrónica.

1.2. Preguntas de directrices

1. ¿Cómo se integran los componentes electrónicos y mecánicos en el diseño del robot seguidor de línea para garantizar su funcionalidad y eficiencia?

La integración de componentes electrónicos y mecánicos se logra mediante un diseño esquemático detallado que define las conexiones entre sensores infrarrojos, microcontrolador, módulo Bluetooth, motores DC y la turbina configurable. La placa PCB personalizada, diseñada con herramientas como EASYEDA, optimiza el espacio y minimiza interferencias, mientras que el chasis impreso en 3D, modelado en software CAD como Fusion 360, aloja todos los componentes de manera ergonómica y resistente. Esta integración asegura un funcionamiento eficiente, compacto y adaptable a diferentes entornos, facilitando el ensamblaje y las pruebas del robot.

2. ¿Qué papel desempeña el control PID en el seguimiento preciso de la línea y cómo se implementa en el robot?

El control PID es fundamental para mantener la estabilidad y precisión del robot al seguir la línea. Implementado en el microcontrolador, ajusta dinámicamente la velocidad y dirección de los motores en función de la posición detectada por los sensores infrarrojos. El componente Proporcional (P) corrige el error actual, el Integral (I) aborda errores acumulados y el Derivativo (D) anticipa cambios futuros. Esta combinación permite un movimiento suave y preciso, minimizando oscilaciones y desviaciones, lo que se traduce en un seguimiento eficiente y estable de la línea.

3. ¿Cómo contribuye la comunicación Bluetooth a la configuración y operación remota del robot seguidor de línea?

La comunicación Bluetooth permite la configuración y operación remota del robot mediante una aplicación móvil como Robo Remo. Esta interfaz facilita el ajuste en tiempo real de parámetros como las constantes PID, la velocidad de los motores y el ángulo de la turbina, además de mostrar datos de telemetría, como la posición y el rendimiento del sistema. Esta funcionalidad no solo mejora la accesibilidad y personalización del aprendizaje, sino que también permite a los estudiantes experimentar y analizar el comportamiento del robot en diferentes condiciones, fomentando una comprensión más profunda de los conceptos de control automático.

4. ¿Qué ventajas ofrece el uso de sensores infrarrojos multiplexados en el diseño del robot seguidor de línea?

Los sensores infrarrojos multiplexados optimizan el uso de los pines del microcontrolador y reducen la complejidad del circuito, permitiendo una detección precisa de la línea con menos componentes. La multiplexación por división de tiempo (TDM) alterna la lectura de los sensores en intervalos específicos, lo que mejora la eficiencia del sistema y

reduce costos. Además, esta técnica facilita la integración de múltiples sensores en un diseño compacto, asegurando un seguimiento estable y adaptable a diferentes superficies y condiciones de iluminación.

5. ¿Cómo se garantiza la potencia y adaptabilidad del chasis del robot seguidor de línea?

La robustez y adaptabilidad del chasis se garantizan mediante su diseño en software CAD, como Fusion 360, que permite modelar una estructura optimizada para la impresión 3D. Utilizando materiales como PLA o ABS, se obtiene un chasis ligero, duradero y resistente, capaz de alojar todos los componentes electrónicos y mecánicos de manera eficiente. Además, el diseño incluye espacios específicos para la PCB, los motores, la batería y la turbina, facilitando el ensamblaje y asegurando que el robot pueda operar en diversos entornos sin comprometer su funcionalidad.

6. ¿Qué impacto tiene la implementación de algoritmos de optimización dinámica en el rendimiento del robot seguidor de línea?

La implementación de algoritmos de optimización dinámica, como el ajuste heurístico del control PID y la sensibilidad de los sensores, mejora significativamente el rendimiento del robot. Estos algoritmos permiten adaptar los parámetros del sistema en tiempo real, optimizando la precisión y eficiencia del seguimiento de la línea incluso en superficies variables y bajo diferentes condiciones de iluminación. Esta capacidad de ajuste dinámico asegura que el robot mantenga un funcionamiento estable y preciso, lo que lo convierte en una herramienta ideal para la enseñanza y experimentación en control automático y robótico.

1.3. Objetivo General

Desarrollar un robot seguidor de línea autónomo e innovador, integrando control PID, comunicación Bluetooth, sensores multiplexados, una PCB personalizada y un chasis impreso

en 3D, para optimizar su desempeño en entornos dinámicos y demostrar su potencial en automatización y robótica industrial.

1.4. Objetivos Específicos

OBJ. 1. Implementar el control PID para optimizar el seguimiento de línea empleando una regleta de 16 sensores multiplexada y ajustando la turbina mediante la librería Servo, con el fin de mejorar la estabilidad y precisión del desplazamiento del robot.

OBJ. 2. Desarrollar una PCB personalizada y un chasis 3D con diseño ergonómico integrando de manera eficiente los componentes electrónicos y mecánicos, para garantizar un ensamblaje compacto, funcional y resistente.

OBJ. 3. Configurar la comunicación Bluetooth para permitir el ajuste dinámico de parámetros en tiempo real, almacenar configuraciones en la EEPROM y mejorar la interacción del usuario con el sistema de control del robot.

1.5. Justificación

En un mundo cada vez más tecnológico, la formación en electrónica y robótica se ha convertido en un pilar fundamental para el desarrollo de habilidades técnicas y creativas en las nuevas generaciones. Sin embargo, la educación en estas áreas enfrenta desafíos significativos, como la falta de herramientas didácticas accesibles, la desconexión entre la teoría y la práctica, y la limitada exposición de los estudiantes a tecnologías modernas como el control automático y la comunicación inalámbrica. Este proyecto, surge como una respuesta innovadora a estas problemáticas.

La implementación de un seguidor de línea con turbina configurable y control PID no solo busca ser una herramienta práctica para el aprendizaje, sino también un puente entre los conceptos teóricos y su aplicación en el mundo real. Al integrar tecnologías como el control

PID, que es ampliamente utilizado en la industria para optimizar sistemas dinámicos, y la comunicación Bluetooth, que permite la configuración remota y la interacción en tiempo real, este proyecto ofrece a los estudiantes la oportunidad de experimentar con sistemas avanzados de manera accesible y didáctica.

Además, este dispositivo fomenta el aprendizaje activo y la resolución de problemas, pudiendo ajustar parámetros, observar el comportamiento del sistema y proponer mejoras. Esto no solo fortalece la comprensión de conceptos clave, como la retroalimentación y el control automático, sino que también desarrolla habilidades prácticas en programación, diseño electrónico y mecánico, y manejo de tecnologías emergentes.

Otro aspecto relevante es la versatilidad del proyecto. Al ser configurable y modular, el dispositivo puede adaptarse a diferentes niveles de complejidad, desde estudiantes principiantes hasta avanzados, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para instituciones educativas con diversos perfiles de alumnos. Asimismo, su enfoque en la educación práctica lo hace ideal para talleres, laboratorios y competencias de robótica, donde los estudiantes pueden aplicar sus conocimientos en un entorno dinámico y colaborativo.

Este proyecto tiene un impacto social al democratizar el acceso a tecnologías avanzadas, contribuyendo a reducir la brecha tecnológica y fomentando la inclusión en el campo de la electrónica y la robótica. También impulsa la innovación y el desarrollo de habilidades técnicas en los estudiantes, preparándolos para los desafíos del futuro y contribuyendo al avance de la educación en electrónica y robótica.

1.6. Alcance

El proyecto se enfoca en el desarrollo de un seguidor de línea con turbina configurable que integra control PID, comunicación Bluetooth, un sistema de sensores multiplexados, una placa interconectora PCB y un chasis elaborado en 3D, con el objetivo de diseñar y construir

un prototipo funcional que cumpla con los requisitos específicos de precisión, eficiencia y adaptabilidad en entornos dinámicos. Su alcance incluye la validación del sistema en entornos educativos para garantizar su utilidad como herramienta didáctica en la enseñanza de conceptos avanzados de electrónica, robótica y control automático, así como de este proyecto que permite la replicabilidad del dispositivo, facilitando que otros usuarios puedan construirlo, utilizarlo y adaptarlo a sus propias necesidades, promoviendo así la innovación y el aprendizaje práctico en estas áreas.

El proyecto enfrenta limitaciones relacionadas con los recursos económicos, esto quiere decir, que está sujeto a un presupuesto limitado que prioriza el uso de componentes asequibles sin comprometer la funcionalidad básica del sistema; además, el desarrollo se lleva a cabo dentro de un plazo definido, lo que implica enfocarse en las funcionalidades esenciales y optimizar el tiempo disponible para cada etapa del diseño y construcción. Se evita la inclusión de elementos excesivamente complejos, asegurando que el proyecto sea accesible y comprensible para su público objetivo, sin sacrificar su capacidad para enseñar conceptos fundamentales de electrónica, robótica y control automático.

El alcance del proyecto se define en función de los objetivos específicos planteados, comenzando con la implementación del control PID para optimizar el seguimiento de línea utilizando una regleta de 16 sensores multiplexada, lo que permite una detección precisa y eficiente de la trayectoria, junto con la configuración de la turbina mediante la librería Servo, que ajusta dinámicamente su velocidad y ángulo para mejorar la funcionalidad del robot.

Además, se desarrolla una PCB personalizada que integra todos los componentes electrónicos de manera eficiente, optimizando el espacio y minimizando interferencias, mientras que el chasis impreso en 3D, diseñado con software CAD, asegura una estructura ergonómica y resistente que facilita el ensamblaje y aloja los componentes mecánicos y electrónicos de forma estable y funcional.

Por último, se configura la comunicación Bluetooth para permitir el ajuste remoto de parámetros en tiempo real, como las constantes PID y la velocidad de la turbina, utilizando una aplicación móvil como Robo Remo, y se implementa el almacenamiento de configuraciones en la memoria EEPROM del microcontrolador, garantizando que los ajustes se conserven incluso después de reiniciar el sistema, lo que facilita la interacción dinámica y la personalización del aprendizaje en entornos educativos.

CAPÍTULO II

MARCO DE REFERENCIAS

Este proyecto involucra diversos aspectos teóricos y prácticos relacionados con electrónica, control, programación y diseño. A continuación, se detalla el fundamento teórico, incluyendo conceptos clave relacionados con el código implementado.

2.1. Fundamento teórico relacionado al trabajo de integración curricular

2.1.1. Robot Autónomo Seguidor de Línea

El robot seguidor de línea es un sistema autónomo diseñado para operar sin intervención humana, destacándose por su capacidad para tomar decisiones en tiempo real basadas en entradas sensoriales. Este robot utiliza sensores infrarrojos (IR) para captar información del entorno, específicamente para detectar y seguir líneas marcadas en una superficie. Estos sensores permiten al robot interpretar su posición relativa a la línea y ajustar su trayectoria de manera dinámica, lo que refleja un alto nivel de precisión y adaptabilidad. La innovación radica en su capacidad para procesar datos sensoriales de manera eficiente y traducirlos en acciones concretas, lo que lo convierte en una solución inteligente y autosuficiente para tareas de seguimiento y navegación.

Además, el robot incorpora actuadores, como motores de corriente continua (DC), que transforman las señales eléctricas generadas por el sistema de control en movimiento físico. Estos motores permiten al robot ejecutar maniobras precisas, como giros y ajustes de velocidad, para mantenerse alineado con la línea que sigue. La integración de sensores y actuadores, junto con un microcontrolador que gestiona la lógica de control, representa una innovación significativa en términos de eficiencia y funcionalidad. Este diseño no solo optimiza el rendimiento del robot, sino que también establece un marco para futuras mejoras

y aplicaciones en robótica autónoma, demostrando cómo la tecnología puede emular procesos de toma de decisiones y ejecución de tareas de manera independiente.

2.1.2. Fundamento Teórico: Aspectos Físicos del Seguidor de Línea con Turbina

El diseño físico de un seguidor de línea con turbina es esencial no solo para optimizar su rendimiento, sino también para proporcionar una comprensión integral del funcionamiento de los robots móviles. Aunque hay principios establecidos, este proyecto se enfoca en la exploración y aprendizaje sin limitar la creatividad, permitiendo a los estudiantes experimentar con distintas configuraciones mientras se mantiene un balance en el rendimiento del robot.

2.1.3. Importancia del Bajo Peso

El peso tiene un impacto directo en el rendimiento del seguidor de línea, especialmente al incorporar una turbina. Un robot liviano tiene varias ventajas en cuanto a manejo y eficiencia.

Las ventajas de un peso reducido son que el robot tendrá una mayor velocidad y agilidad, siendo más liviano, el robot puede acelerarse más rápidamente, lo que permite que pueda seguir la línea a altas velocidades sin comprometer su capacidad de reacción. Además tendrá mejor maniobrabilidad, por lo que un seguidor de línea ligero puede realizar giros más precisos sin perder tracción, lo cual es crucial para la efectividad del sistema de control de motores.

Finalmente se reduce el consumo energético, porque el peso menor implica que los motores no tienen que trabajar tanto para mantener el movimiento, lo que resulta en una mayor duración de la batería y menor consumo de energía. (Murphy, R. R., 2019).

2.1.4. Dimensiones del Seguidor de Línea

Las dimensiones del seguidor de línea influyen en la estabilidad, maniobrabilidad y eficacia de los componentes. Si bien las dimensiones no deben ser rígidas, es importante comprender cómo afectan al rendimiento general del robot. (Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D., 2011).

2.1.5. Diseño Esquemático de los Componentes

El esquemático de componentes en un proyecto de diseño electrónico es una representación gráfica y detallada de cómo los diferentes componentes electrónicos se interconectan para formar un circuito funcional. En el contexto del proyecto que mencionas, el esquemático cumple varias funciones clave.

El esquemático de componentes integra de manera precisa los sensores, microcontrolador, módulo Bluetooth y motores, definiendo las conexiones esenciales para su funcionamiento conjunto. Los sensores, como los de temperatura o proximidad, se conectan al microcontrolador mediante pines de entrada/salida específicos, complementados con resistencias de pull-up/pull-down y otros elementos que aseguran su operación adecuada.

El microcontrolador, núcleo del sistema, establece conexiones de alimentación, tierra y comunicación a través de protocolos como I2C, SPI o UART, además de gestionar los pines de control para los motores y otros periféricos. El módulo Bluetooth se enlaza al microcontrolador principalmente mediante comunicación serial (UART), incorporando condensadores y resistencias para garantizar la estabilidad de la señal. Por último, los motores se integran al circuito mediante drivers como puentes H, cuyos pines de control son manejados por el microcontrolador para regular su velocidad y dirección, completando así la interconexión funcional de todos los componentes.

Además, el esquemático aporta elementos clave en el diseño de la placa PCB al definir el trazado de pistas, que establece cómo las conexiones de cobre interconectarán los componentes según las rutas especificadas. Además, guía el posicionamiento físico de cada componente en la PCB, optimizando el espacio disponible y reduciendo interferencias electromagnéticas. Asimismo, influye en la decisión sobre el número de capas de la PCB, ya sea de una cara, doble cara o múltiples capas, en función de la complejidad del circuito y los requisitos de integración. (Horowitz, P., & Hill, W., 2015).

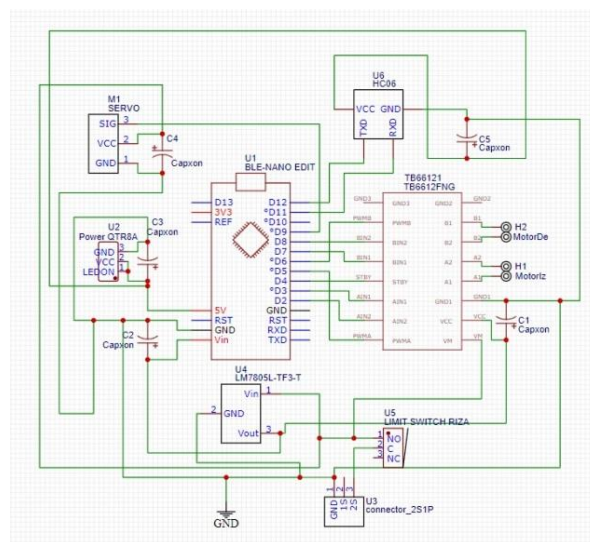


Figura 1. Modelo Diseño Esquemático de Distribución de los Componentes. Fuente: José Tapia (2025.)

2.1.6. Chasis del Robot

Un chasis más grande puede proporcionar mayor estabilidad, pero al mismo tiempo puede dificultar la rapidez en los giros. Un diseño más compacto favorece la agilidad, pero podría afectar la distribución de los componentes y la estabilidad en superficies irregulares. Las dimensiones también dependerán de factores como el tamaño de la batería, sensores y la turbina.

El chasis fue diseñado en CAD e impreso en 3D con material PLA, se le incluye un par de llantas Minisumo, de alta calidad y excelente agarre. Tienen 3mm de diámetro, 20mm

de anchura, el peso es de 15gr. por llanta, con eje de acoplamiento de 3mm y diámetro del rin 22mm.

Los sensores deben estar alineados de manera que puedan detectar la línea con precisión. Un chasis demasiado pequeño podría dificultar el espacio necesario para colocar los sensores correctamente, mientras que un chasis grande podría reducir la agilidad del robot.



Figura 2. Modelo de Chasis impreso en 3D con PLA. Fuente: José Tapia Velásquez (2025.)



Figura 3. Llantas Minisumo. Fuente: Plataforma de Compra (2025.).



Figura 4. Impresora 3D. Fuente: Google (2025.)

Es importante indicar que no existen dimensiones fijas que deban seguirse estrictamente, esto depende del entorno de aprendizaje o de reglas de competencia, se pueden hacer ajustes. Lo más importante es comprender cómo el tamaño y la forma afectan al comportamiento del robot, y cómo estos factores pueden influir en la velocidad, precisión y maniobrabilidad. (Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). 2016).

2.1.7. Turbina de Succión

El tamaño de la turbina debe ser adecuado para generar suficiente succión sin comprometer el peso y el espacio dentro del chasis. Un diseño eficiente debe equilibrar el tamaño de la turbina con la capacidad de los motores para mover el robot.

La turbina de succión juega un papel clave en la estabilidad del robot, permitiéndole adherirse al suelo mientras se mueve. La función de la turbina es reducir la fricción entre el seguidor de línea y la superficie, aumentando la precisión del movimiento al minimizar derrapes y deslizamientos, generando un vacío o succión bajo el robot, lo que crea una fuerza de adherencia al suelo. Esta fuerza de succión ayuda a mejorar la tracción y precisión en las curvas y al seguir la línea.

La fuerza de succión depende de la velocidad de la turbina, el tamaño de las entradas de aire y el tipo de superficie. Una mayor velocidad en la turbina genera más succión, pero también aumenta el consumo de energía y peso relativo del robot, por lo que debe encontrarse un equilibrio adecuado.

La turbina debe estar montada de manera que maximice la succión sin añadir peso innecesario al robot. Su tamaño y velocidad deben ser ajustados para proporcionar una adherencia suficiente para evitar el deslizamiento en superficies lisas. (Bekey, G. A., 2005).



Figura 5. Turbina de Succión AEO Brushless. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)

En un seguidor de línea con turbina, la carga aerodinámica juega un papel muy específico, y en este caso, está directamente relacionada con el funcionamiento de la turbina. A una escala pequeña, como la de un robot de este tipo, la carga aerodinámica convencional (como la que se podría esperar en vehículos a gran escala) tiene un impacto mínimo debido al tamaño y la velocidad del robot.

La principal fuente de carga aerodinámica en este diseño es la succión creada por la turbina, que influye en la adherencia del robot al suelo.

Dado que el robot tiene dimensiones reducidas, la carga aerodinámica convencional no tiene un impacto significativo sobre el movimiento del seguidor de línea.

Por lo tanto, el diseño se enfoca principalmente en la turbina, siendo el componente encargado de proporcionar la adherencia necesaria sin que se requiera una carga aerodinámica más compleja o sofisticada. (McMichael, J. M., & Francis, M. S., 1997).

2.1.8. Material para la Ventosa

Para mejorar la precisión del seguidor de línea en movimiento y evitar el derrape, se utiliza un material como papel o algún material similar que tenga propiedades deslizantes, pero que también ayude a crear una ventosa para adherir el seguidor al suelo. Este efecto de succión es fundamental para mejorar la tracción y evitar que el robot se deslice, lo cual es crucial para un rendimiento más preciso y controlado.

El material utilizado para la ventosa debe ser flexible y capaz de adaptarse a la superficie sobre la que se mueve el robot. El papel o materiales similares permiten que el robot se adhiera al suelo sin perder movilidad; el material debe adaptarse ligeramente al rellenar los huecos microscópicos de la superficie.

A pesar de la succión, el robot debe mantener la capacidad de moverse sin quedar atascado. El material utilizado debe tener un deslizamiento controlado que permita que el robot se mueva con precisión sin perder su capacidad de adherencia. (Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.), 2016).



Figura 6. Diseño Pista de Seguidor de Línea. Fuente: Foto José Tapia (2025.)

2.1.9. Sensores Multiplexados

La multiplexación por división de tiempo (TDM) permite alternar la lectura de varios sensores en intervalos específicos, optimizando el uso de recursos del microcontrolador, esta técnica reduce significativamente la complejidad del circuito y minimiza el número de componentes necesarios, simplificando el diseño y mejorando la eficiencia del sistema.

En este proyecto, se utilizarán estos sensores para optimizar el uso de los pines del microcontrolador y reducir costos.

El almacenamiento de los valores configurados en la memoria EEPROM del Arduino conservan las configuraciones, lo que permitirá que el robot conserve sus configuraciones incluso después de ser apagado. La memoria EEPROM tiene un número limitado de ciclos de

escritura, por lo que se deberá implementar un mecanismo para evitar escrituras innecesarias y prolongar la vida útil de la memoria. (Patterson, D. A., & Hennessy, J. L. (2017).

El objetivo principal de un seguidor de línea es detectar y seguir una trayectoria marcada. Esto se logra mediante sensores ópticos que miden el contraste entre la línea y el fondo. En este proyecto, se utiliza una regleta de 16 sensores multiplexada, lo que requiere gestionar el muestreo de los sensores mediante código para optimizar la detección.



Figura 7. Regleta de 16 Sensores Reflectivos Multiplexados. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)



Figura 8. Placa Arduino NANO V3.0 FTDI con Cable USB. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)



Figura 9. Kit 40 Cables Arduino Macho-Hembra Dupont-Jumper. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)

2.1.10. Control PID (Proporcional-Integral-Derivativo)

Los controladores en este proyecto son fundamentales para gestionar y coordinar el funcionamiento del robot seguidor de línea. Su principal función es procesar las señales de los sensores infrarrojos multiplexados, aplicar el algoritmo de control PID para ajustar el movimiento de los motores y garantizar un seguimiento preciso y estable de la línea. (Aström, K. J., & Hägglund, T., 2006). Además, los controladores permiten la comunicación Bluetooth para la configuración remota en tiempo real y la integración de la turbina mediante la librería Servo, asegurando un sistema autónomo, eficiente y adaptable a diferentes condiciones del entorno.

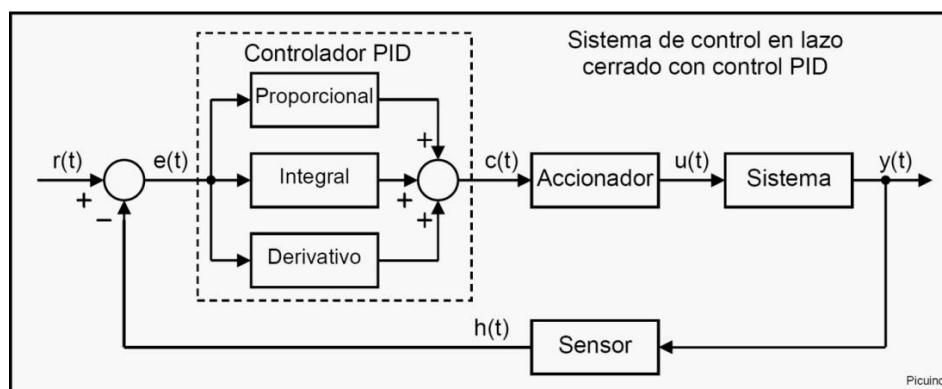


Figura 10. Modelo Esquema del Control PID. Fuente: José Tapia Velásquez (2025.)

2.1.11. Motores y Control PWM

El módulo TB6612FNG se utiliza para controlar los motores Pololu mediante PWM. El PWM permite variar la velocidad del motor ajustando el ciclo de trabajo de una señal digital. (Wilmshurst, T., 2010).

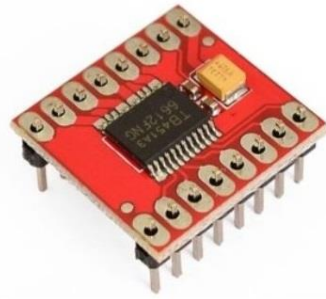


Figura 11. Controlador Dual de Motores Puente H. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)



Figura 12. Controlador de Motor ESC Brushless BLHELI-S HSKRC, Fuente: Plataforma de Compra (2025.)

2.1.12. Comunicación Bluetooth y RoboRemo

La aplicación Robo Remo aporta una interfaz intuitiva y versátil para el control y monitoreo remoto del robot, permitiendo una interacción fluida entre el usuario y el sistema. A través de una conexión Bluetooth, la aplicación facilita la visualización en tiempo real de datos sensoriales, como la posición del robot respecto a la línea, y permite enviar comandos para ajustar su comportamiento, como cambios de velocidad o dirección. Esta integración no solo mejora la experiencia del usuario al ofrecer un control accesible desde dispositivos móviles, sino que también amplía las capacidades del robot al habilitar la supervisión y el ajuste remoto de sus funciones, lo que resulta especialmente útil en entornos donde la intervención directa no es posible. Así, Robo Remo se convierte en una herramienta clave para optimizar la operación y el análisis del rendimiento del robot.

La aplicación Robo Remo también juega un papel crucial en la configuración y ajuste de los parámetros del controlador PID (K_P , K_I , K_D) en el proyecto, permitiendo una sintonización precisa y remota del sistema de control del robot.. A través de la interfaz de la aplicación, el usuario puede modificar en tiempo real los valores de la constante proporcional (K_P), la constante integral (K_I) y la constante derivativa (K_D), lo que influye directamente en la respuesta del robot ante cambios en su entorno, como desviaciones de la línea. (Valvano, J. W., 2011). Esta capacidad de ajuste dinámico facilita la optimización del comportamiento del robot, mejorando su estabilidad, velocidad de corrección y precisión en el seguimiento de la trayectoria. Robo Remo, al integrarse con el sistema de control, no solo simplifica el proceso de calibración, sino que también permite una evaluación inmediata de los cambios, lo que resulta en un rendimiento más eficiente y adaptativo del robot.



Figura 13. Logo de Aplicación Robo Remo. Fuente: Internet (2015.)

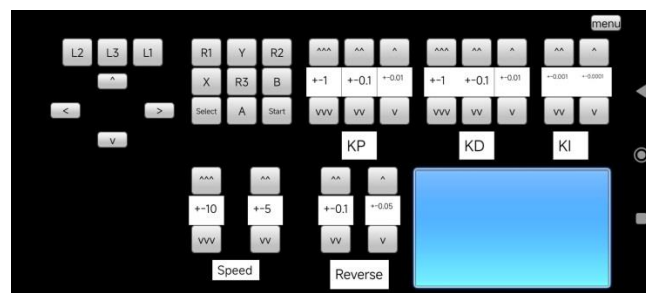


Figura 14. Modelo de Configuración y ajuste de los parámetros del Controlador PID (K_P , K_I , K_D). Fuente: José Tapia Velásquez (2024.)

El módulo HC-05 permite enviar y recibir comandos en tiempo real. La aplicación RoboRemo facilita la comunicación, permitiendo al usuario modificar parámetros como las constantes PID o la velocidad de la turbina.

Los comandos enviados desde RoboRemo se interpretan mediante los comandos switch y case, facilitando la ejecución de acciones específicas.



Figura 15. Módulo Bluetooth HC-05 para Arduino PIC.PC. ATME. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)

2.1.13. Almacenamiento e EEPROM

La aplicación EASYEDA contribuye significativamente al proyecto al proporcionar una plataforma integral para el diseño, simulación y desarrollo del circuito electrónico y la placa PCB. Esta herramienta permite crear esquemáticos detallados que definen las conexiones entre los componentes, como sensores, microcontroladores y actuadores, asegurando un diseño preciso y funcional. Además, facilita el trazado de pistas y el posicionamiento de componentes en la PCB, optimizando el espacio y minimizando interferencias electromagnéticas. (Scherz, P., & Monk, S., 2016). EASYEDA también ofrece capacidades de simulación, lo que permite verificar el comportamiento del circuito antes de su fabricación, reduciendo errores y costos. Su entorno colaborativo y accesible agiliza el proceso de diseño, haciendo que la transición desde el concepto hasta la implementación física sea más eficiente y confiable.



Figura 16. Logo Aplicación EASYEDA. Fuente: Internet (2025.)

2.1.14. Placa PCB personalizada

Una PCB (Placa de Circuito Impreso) es una superficie que interconecta componentes electrónicos de manera eficiente. El diseño de una PCB personalizada para este proyecto permitirá integrar todos los componentes en un solo circuito, mejorando la confiabilidad y reduciendo el tamaño del robot.

El diseño de la PCB se realiza utilizando software especializado como EASYEDA o PROTEUS, que permiten crear esquemas y layouts precisos; una vez finalizado el diseño, la fabricación puede llevarse a cabo mediante técnicas como el grabado químico para prototipos básicos o recurriendo a servicios de fabricación profesional para obtener circuitos impresos de alta calidad y precisión. (Coombs, C. F., 2007)

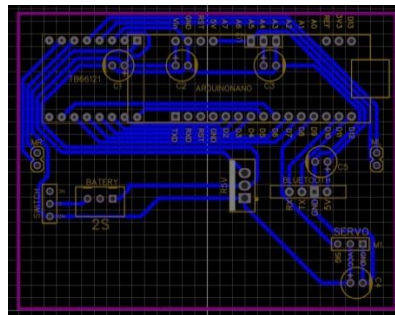


Figura 17. Modelo de Diseño de la Huella Placa PCB Personalizada en CAD. Fuente: José Tapia Velásquez (2025.)



Figura 18. Espadines en Ángulo Macho. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)



Figura 19. Espadines Rectos Macho. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)



Figura 20. Espadines Rectos Hembra. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)



Figura 21. Capacitor Cerámico. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)

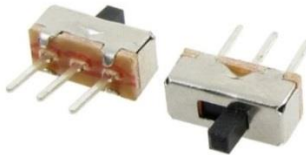


Figura 22. Interruptor Deslizable. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)

2.1.15. Regulador de Voltaje 220

El Regulador de Voltaje estabiliza el voltaje de alimentación, protegiendo los componentes electrónicos del robot de fluctuaciones y asegurando un funcionamiento estable y seguro. (Horowitz, P., & Hill, W., 2015).

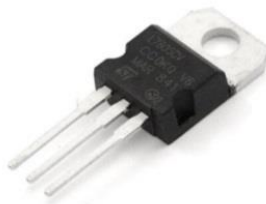


Figura 23. Regulador de Voltaje 220. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)

2.1.16. Batería Lipo 2S

La Batería Lipo suministra energía portátil y eficiente al sistema, proporcionando la autonomía necesaria para que el robot opere sin conexión a una fuente externa, optimizando su movilidad y rendimiento. (Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D., 2011)



Figura 24. Batería Lipo 2S. Fuente: Plataforma de Compra (2025.)

2.1.17. Algoritmos de Optimización

La optimización dinámica se refiere al ajuste en tiempo real de los parámetros del sistema para mejorar su rendimiento. (Boyd, S., & Vandenberghe, L., 2004). En este proyecto, se aplicará para ajustar el control PID y la respuesta de los sensores en función de las condiciones del entorno.

Los algoritmos de optimización, como el ajuste heurístico, se implementan para mejorar el rendimiento del robot, permitiendo adaptar dinámicamente parámetros como el control PID y la sensibilidad de los sensores; esto garantiza una mayor precisión y eficiencia en el seguimiento de líneas, incluso en superficies variables y bajo diferentes condiciones de iluminación, optimizando su funcionamiento en entornos diversos.

2.1.18. Ensamblaje

El ensamblaje del robot seguidor de línea comienza con la integración de la PCB personalizada, que conecta y organiza los componentes electrónicos, como el microcontrolador, sensores infrarrojos multiplexados y reguladores de voltaje. Luego, se montan los motores DC y la turbina AEO en el chasis impreso en 3D, asegurando un diseño ergonómico y resistente. Los sensores se colocan en la parte inferior para detectar la línea,

mientras que la batería Lipo 2S se instala para proporcionar energía portátil. Finalmente, se conectan todos los módulos, se verifica la comunicación Bluetooth y se programa el control PID, asegurando que el robot funcione de manera autónoma, precisa y eficiente, resultando en un prototipo óptimo y listo para operar en diversas condiciones. (Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.), 2016).

El marco teórico de este proyecto se basa en principios fundamentales de la electrónica, la robótica y el control de sistemas, integrando tecnologías avanzadas para crear una herramienta educativa innovadora. Este enfoque no solo permite a los estudiantes comprender conceptos teóricos, sino también desarrollar habilidades prácticas y creativas, preparándolos para los desafíos de la ingeniería moderna.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

El desarrollo del proyecto requiere un enfoque metodológico estructurado y sistemático que garantice la consecución de sus objetivos. Este marco metodológico se basa en un proceso iterativo y colaborativo, que combina investigación, diseño, implementación y validación, con el fin de crear una herramienta educativa funcional y efectiva.

En este contexto, la metodología adoptada integra etapas claramente definidas, desde la revisión teórica y el diseño conceptual hasta la construcción del prototipo y su evaluación en entornos educativos. Cada fase del proyecto está guiada por los objetivos específicos, lo que permite abordar de manera organizada los desafíos técnicos y pedagógicos identificados. Además, se enfatiza la importancia de la documentación y la replicabilidad, asegurando que el proyecto no solo cumpla con sus metas inmediatas, sino que también sirva como base para futuras investigaciones y desarrollos.

Este marco metodológico no solo busca garantizar el éxito técnico del proyecto, sino también su impacto en la formación de estudiantes, proporcionándoles una herramienta práctica e innovadora para el aprendizaje de conceptos avanzados en electrónica y robótica. A través de este enfoque, se espera contribuir al avance de la educación en estas áreas, fomentando la creatividad, la experimentación y el pensamiento crítico en las nuevas generaciones de ingenieros y tecnólogos.

3.1. El método científico

Este proyecto se fundamenta en principios científicos y tecnológicos establecidos en áreas como la teoría de control automático, la electrónica embebida, la comunicación inalámbrica y la mecánica aplicada.

Teoría de Control Automático y Control PID

El control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es un algoritmo fundamental en sistemas de control, diseñado para mantener una variable de proceso en un valor deseado con alta precisión. En este proyecto, el control PID se implementa para asegurar que el robot siga una línea de manera precisa, ajustando de forma dinámica la velocidad y dirección de los motores en respuesta a las señales captadas por los sensores. Este mecanismo permite una corrección continua y adaptativa, lo que resulta esencial para mantener la trayectoria deseada.

La base científica del control PID se sustenta en tres acciones principales: la acción proporcional, que responde al error actual proporcionando una corrección directamente proporcional a la desviación; la acción integral, que aborda los errores acumulados a lo largo del tiempo, eliminando desviaciones residuales que podrían afectar el desempeño; y la acción derivativa, que anticipa cambios futuros en el error, mejorando así la estabilidad del sistema y reduciendo oscilaciones. Este enfoque integral permite optimizar el comportamiento del robot, minimizando las oscilaciones y maximizando la eficiencia en el seguimiento de la línea, lo que resulta en un funcionamiento más suave y preciso.

Electrónica Embebida y Microcontroladores

El proyecto emplea un microcontrolador Arduino como núcleo central del sistema, lo que facilita la integración de sensores, actuadores y módulos de comunicación en una plataforma compacta y eficiente. La electrónica embebida se estructura en torno a tres aspectos clave: el procesamiento de señales, donde los sensores infrarrojos multiplexados capturan datos del entorno, los cuales son procesados por el microcontrolador para tomar decisiones en tiempo real; el control de actuadores, que se gestiona mediante señales PWM (Modulación por Ancho de Pulso), permitiendo un ajuste preciso de la velocidad y posición de los motores DC y la turbina; y el uso de memoria EEPROM, que se encarga de almacenar

configuraciones específicas, garantizando así la persistencia de los parámetros ajustados por el usuario incluso después de reiniciar el sistema. Esta combinación de elementos permite un funcionamiento robusto y adaptable, asegurando que el sistema responda de manera eficiente a las demandas del entorno y las necesidades del usuario.

Comunicación Inalámbrica y Protocolo Bluetooth

La implementación de la comunicación inalámbrica y el protocolo Bluetooth en el robot seguidor de línea se basa en principios científicos de transmisión de datos y redes inalámbricas. La comunicación inalámbrica permite la transferencia de información entre dispositivos sin necesidad de conexiones físicas, utilizando ondas electromagnéticas para enviar y recibir datos.

En este proyecto, el protocolo Bluetooth, una tecnología de comunicación de corto alcance, se emplea para establecer un enlace inalámbrico entre el robot y un dispositivo externo, como un teléfono inteligente o una computadora.

El protocolo Bluetooth opera en la banda de frecuencia de 2.4 GHz, utilizando técnicas de modulación para codificar y transmitir datos de manera eficiente. Este protocolo permite una comunicación bidireccional, lo que facilita el envío de comandos desde el dispositivo externo al robot, como ajustes de velocidad o parámetros del control PID, y la recepción de datos de telemetría, como la posición del robot o el estado de los sensores. La implementación de Bluetooth en el robot se realiza mediante un módulo como el HC-05, que se conecta al microcontrolador a través de comunicación serial (UART), permitiendo una configuración sencilla y una integración eficiente en el sistema.

La teoría científica detrás de esta implementación incluye conceptos como la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) para la transmisión de datos, la gestión

de paquetes de información para garantizar la integridad de los datos, y la sincronización entre dispositivos para mantener una conexión estable.

Estos principios permiten que el robot seguidor de línea sea configurable y monitoreable de manera remota, lo que no solo mejora su funcionalidad, sino que también lo convierte en una herramienta educativa interactiva y versátil para el aprendizaje de conceptos avanzados en electrónica y robótica.

Mecánica Aplicada y Diseño de la Turbina

La turbina configurable es un componente fundamental dentro del proyecto, y su diseño se fundamenta en principios de mecánica aplicada, particularmente en conceptos aerodinámicos que determinan su funcionamiento óptimo. La potencia y la velocidad de la turbina son factores críticos que influyen directamente en su eficiencia, lo que demanda un diseño meticuloso para maximizar su rendimiento. Este enfoque asegura que la turbina opere de manera eficiente, aprovechando al máximo las características aerodinámicas para lograr un desempeño equilibrado y efectivo en su aplicación específica.

Multiplexación de Sensores

La regleta de 16 sensores infrarrojos multiplexados ofrece una detección de alta resolución de la línea, lo que resulta esencial para garantizar un seguimiento preciso y confiable.

La multiplexación se fundamenta en dos aspectos clave: la reducción de pines, que permite disminuir el número de conexiones necesarias en el microcontrolador, optimizando así el uso de recursos y simplificando el diseño del circuito; y la lectura secuencial, que posibilita capturar datos detallados del entorno al leer los sensores en un orden específico, mejorando significativamente la precisión del seguimiento. Este enfoque no solo maximiza la eficiencia del sistema, sino que también asegura una respuesta rápida y adaptativa a las variaciones en la trayectoria, lo que resulta en un funcionamiento más robusto y confiable.

Educación en Electrónica y Robótica

El proyecto se distingue por su fuerte enfoque educativo, fundamentado en metodologías de aprendizaje activo y principios del constructivismo, lo que lo convierte en una herramienta pedagógica altamente efectiva. Los estudiantes tienen la oportunidad de interactuar directamente con el sistema, ajustando parámetros y observando su impacto en tiempo real, lo que promueve un aprendizaje práctico y significativo. Este enfoque no solo facilita la comprensión de conceptos teóricos, sino que también fomenta el desarrollo de habilidades esenciales como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la capacidad de aplicar conocimientos avanzados en electrónica y robótica. Al involucrar a los estudiantes en un proceso de experimentación y descubrimiento, el proyecto no solo enriquece su formación académica, sino que también les prepara para enfrentar desafíos tecnológicos con confianza y creatividad.

Optimización y Validación Científica

El proyecto incorpora un proceso de optimización y validación basado en el método científico, comenzando con pruebas iterativas que permiten ajustar los parámetros del sistema, como las constantes PID y la configuración de la turbina, para garantizar su estabilidad y eficiencia en el seguimiento de la línea. Estas pruebas repetidas aseguran que el robot funcione de manera óptima en diferentes condiciones y superficies, refinando su comportamiento a través de múltiples ciclos de evaluación y ajuste.

Además, se realiza un análisis detallado de los datos obtenidos de los sensores y actuadores, lo que permite identificar áreas de mejora y optimizar el rendimiento del robot. Este análisis incluye la evaluación de la precisión en la detección de la línea, la respuesta del control PID y la eficiencia de los motores, proporcionando información valiosa para afinar el sistema y asegurar su funcionamiento confiable.

El sistema es validado en entornos de competencia y educativos reales, donde se prueba su utilidad como herramienta didáctica. Durante esta fase, se recopila retroalimentación de estudiantes y docentes, evaluando la efectividad del robot para enseñar conceptos avanzados de electrónica, robótica y control automático. Esta validación en contextos prácticos asegura que el proyecto cumpla con sus objetivos educativos y sea una herramienta accesible y efectiva para el aprendizaje.

Diseño de la Placa PCB

El método científico aplicado al diseño de la placa PCB comienza con la observación y definición del problema, identificando la necesidad de una placa PCB que integre eficientemente los componentes electrónicos y un chasis que aloje de manera óptima los elementos mecánicos y electrónicos.

Se formula la hipótesis de que el uso de herramientas como EASYEDA para el diseño de la PCB permitirá crear un sistema funcional, compacto y adaptable.

En la fase de experimentación, se procede al diseño de la PCB utilizando EASYEDA, donde se trazan las conexiones entre los componentes, se optimiza el espacio y se minimizan las interferencias electromagnéticas, asegurando un diseño preciso y eficiente.

Durante la recolección de datos, se realizan simulaciones en ambas herramientas para verificar la viabilidad del diseño, identificando posibles errores o áreas de mejora. Estos datos se analizan para refinar el diseño, ajustando el trazado de pistas en la PCB y la estructura del chasis, asegurando que ambos cumplan con los requisitos técnicos y funcionales del proyecto.

En la fase de conclusión y validación, se fabrica un prototipo de la PCB y se imprime el chasis en 3D, realizando pruebas físicas para comprobar su funcionalidad y eficiencia. Los resultados obtenidos permiten validar la hipótesis inicial, demostrando que el uso de

EASYEDA y Fusion 360 es efectivo para crear un sistema integrado y optimizado, listo para su implementación en el robot seguidor de línea.

Fundamento Teórico de Circuitos

El diseño de una PCB se basa en los principios de la teoría de circuitos, que incluye la ley de Ohm, las leyes de Kirchhoff, y el análisis de circuitos en serie y paralelo. Estos principios son esenciales para determinar la disposición de los componentes y las rutas de conexión.

Metodología de Diseño

El primer paso es crear un esquemático que represente las conexiones eléctricas entre los componentes. Este esquemático sirve como guía para el diseño físico de la PCB.

Utilizando software de diseño de PCB EASYEDA se traza el layout de la placa, definiendo la ubicación de los componentes y las rutas de conexión. Se deben considerar factores como la longitud de las trazas, el ancho de las pistas, y la separación entre ellas para evitar interferencias.

Antes de la fabricación, se realizan simulaciones para verificar el funcionamiento del circuito y la integridad de la señal.

Una vez verificado el diseño, se procede a la fabricación de la PCB, seguida del ensamblaje de los componentes. Esto puede incluir la soldadura manual o el uso de máquinas de colocación de componentes.

Diseño en 3D del Chasis

En el proceso de diseño utilizando Fusion 360, se lleva a cabo la modelización tridimensional del chasis, integrando aspectos clave como la ergonomía, la resistencia

estructural y la accesibilidad de los componentes, con el objetivo de asegurar un ensamblaje eficiente y un rendimiento estable del dispositivo. Este enfoque permite visualizar y ajustar el diseño en un entorno virtual antes de la fabricación, optimizando así la funcionalidad y la durabilidad del producto final.

Los fundamentos teóricos que sustentan el diseño del chasis abarcan diversas disciplinas, entre las que destaca la mecánica de sólidos, la cual analiza las fuerzas y tensiones que afectarán al dispositivo, incluyendo la resistencia a la flexión, la torsión y las vibraciones, garantizando que el chasis pueda soportar las condiciones operativas previstas.

Además, la ciencia de materiales juega un papel esencial en la selección del material adecuado, evaluando propiedades como la densidad, la resistencia a la tracción, la conductividad térmica y la resistencia a la corrosión, para asegurar que el material elegido cumpla con los requisitos técnicos y ambientales. Por último, la ergonomía y el diseño industrial son fundamentales para crear un chasis que no solo sea funcional, sino también cómodo y atractivo, considerando aspectos como la interfaz de usuario, la facilidad de montaje y la accesibilidad de los componentes, lo que contribuye a una experiencia de usuario satisfactoria y a un producto final bien integrado en su entorno de uso.

Metodología de Diseño

La metodología de diseño comienza con el modelado tridimensional, donde se emplean herramientas de CAD como Fusión 360, para desarrollar un modelo detallado del chasis; este modelo debe incorporar todas las dimensiones y características necesarias para alojar de manera precisa la PCB y los demás componentes, asegurando un diseño funcional y optimizado desde la etapa inicial.

Una vez finalizado el diseño en 3D, se avanza hacia el prototipado rápido, fase en la que se materializa el concepto mediante técnicas como la impresión 3D, permitiendo la

creación de un prototipo físico que facilita la verificación del ajuste de los componentes y la realización de pruebas funcionales, lo que asegura que el diseño cumpla con los requisitos técnicos antes de pasar a la producción.

Integración de la PCB y el Chasis

La integración de la PCB y el chasis requiere una cuidadosa planificación y diseño para garantizar un funcionamiento óptimo del dispositivo; en primer lugar, es esencial asegurar la compatibilidad mecánica, lo que implica que la PCB debe encajar de manera precisa dentro del chasis, contando con orificios y soportes diseñados específicamente para fijarla en su posición correcta, además de alinear correctamente los conectores y puertos con las aberturas correspondientes en el chasis, facilitando así la conexión y operación del dispositivo.

Por otro lado, la compatibilidad electromagnética es un aspecto crítico que no puede pasarse por alto; el chasis debe estar diseñado para ofrecer un blindaje efectivo que minimice las interferencias electromagnéticas, especialmente en dispositivos que manejan señales sensibles o que operan en entornos con alta presencia de ruido eléctrico, asegurando así la integridad de las señales y el rendimiento confiable del sistema en su conjunto.

Pruebas y Validación

Las pruebas y validación son una fase crucial en el desarrollo del dispositivo, comenzando con las pruebas de montaje, donde se verifica que la PCB y el chasis encajan de manera precisa y que todos los componentes están correctamente alineados y accesibles, asegurando así que el ensamblaje final sea eficiente y libre de errores; este paso es fundamental para detectar posibles incompatibilidades mecánicas antes de avanzar a etapas más complejas.

Posteriormente, se llevan a cabo las pruebas funcionales, diseñadas para confirmar que el dispositivo opera de manera adecuada dentro del chasis, incluyendo evaluaciones específicas como pruebas de vibración que permiten identificar posibles fallos o desajustes durante el funcionamiento, garantizando que el sistema sea estable y confiable bajo condiciones normales de uso.

Se realizan las pruebas de durabilidad, cuyo objetivo es asegurar que el dispositivo puede soportar las condiciones de operación a largo plazo, sometiéndolo a situaciones que simulan el desgaste y estrés que experimentará durante su vida útil, lo que permite validar la robustez del diseño y la selección de materiales, asegurando así un producto final resistente y de alta calidad.

El diseño de una placa PCB interconectora y el diseño en 3D del chasis son procesos complejos que requieren una comprensión profunda de múltiples disciplinas científicas y técnicas. La integración exitosa de estos dos elementos es crucial para el desarrollo de dispositivos electrónicos funcionales, eficientes y duraderos. La metodología descrita proporciona un marco sólido para abordar estos desafíos, asegurando que el producto final cumpla con los requisitos de rendimiento y calidad.

El marco científico del proyecto integra conocimientos teóricos y prácticos de diversas disciplinas, proporcionando una base sólida para el diseño, implementación y validación del seguidor de línea con turbina configurable. Este enfoque no solo garantiza el éxito técnico del proyecto, sino también su impacto en la educación, fomentando el aprendizaje práctico y la innovación en electrónica y robótica.

3.1.1. Tipos de investigación

Para este proyecto se han utilizado varios tipos de investigación que permiten abordar tanto los aspectos técnicos como los pedagógicos del desarrollo.

Investigación Aplicada

Este tipo de investigación se centró en la resolución de problemas prácticos y la creación de soluciones tecnológicas. En el proyecto, la investigación aplicada se utilizó para diseñar e implementar el control PID en el seguidor de línea, desarrollar la interfaz Bluetooth para la configuración remota del robot, optimizar el funcionamiento de la turbina y los sensores multiplexados, diseñar la placa PCB con EASYEDA, diseñar el chasis en 3D con Fusion 360 e integrar todos los componentes en un sistema funcional y estable.

La investigación es aplicada para garantizar que el prototipo cumpla con los objetivos técnicos y sea útil en entornos educativos.

Investigación Experimental

La investigación experimental se utilizó para probar y validar las hipótesis y diseños propuestos, como son la realización de pruebas iterativas del control PID para ajustar las constantes (K_p , K_i , K_d) y optimizar el seguimiento de la línea. Se experimentó con diferentes configuraciones de la turbina (potencia) para evaluar su impacto en el comportamiento del robot.

La prueba de la comunicación Bluetooth y la interfaz de usuario para garantizar su funcionalidad y facilidad de uso.

La validación del sistema en diferentes condiciones de pista y entornos educativos.

La optimización de la distribución de componentes en el diseño de la placa PCB para reducir espacio.

El cambio de diseño del chasis elaborado en 3D para adaptarse a las reglas de competencia, reducir el material utilizado y el peso total.

Investigación Descriptiva

La investigación descriptiva se utilizó para documentar y analizar las características y comportamientos del sistema, lo que permitió realizar la descripción del funcionamiento de los sensores multiplexados y su contribución a la precisión del seguimiento, realizar la documentación del proceso de implementación del control PID y su impacto en la estabilidad del robot y los análisis de las ventajas y limitaciones de la comunicación Bluetooth en la configuración remota del dispositivo. También permitió realizar los registros de las configuraciones almacenadas en la memoria EEPROM y su utilidad para el usuario; realizar los diferentes modelos de placas PCB utilizadas en diversos seguidores de línea y finalmente, realizar diferentes modelos de chasis en 3D cubrir las fallas de balance, peso y distribución de la placa, motores y componentes.

Este enfoque permite comprender en detalle cómo funciona el sistema y cómo interactúan sus componentes.

Investigación Documental

La investigación documental permitió recopilar información teórica y técnica que sustenta el proyecto, como son: la revisión de la literatura sobre control PID, sistemas embebidos, comunicación Bluetooth y diseño mecánico: realizar el estudio exhaustivo de diferentes tipos y modelos de seguidores de línea, tanto con turbina como sin turbina proveniente vídeos los cuales muestran competencias y/o su desempeño en el seguimiento de línea.

La investigación de código, el cual brinda la capacidad de leer las señales de la regleta de 16 sensores multiplexada y la calibración de las mismas, además de realizar prácticas en el diseño de placa PCB de manera reiterada buscando la mejor distribución de componentes.

Realizar las consultas de manuales técnicos de los componentes utilizados (microcontroladores, sensores, motores, etc.) y también realizar la investigación de metodologías de enseñanza en electrónica y robótica para garantizar que el proyecto sea una herramienta educativa efectiva. Este tipo de investigación proporciona la base teórica necesaria para el desarrollo del proyecto.

Investigación de Desarrollo Tecnológico

Este tipo de investigación se enfocó en la creación de un producto con sistema innovador, lo cual permitió diseñar y construir un prototipo funcional del seguidor de línea con turbina, configurable; desarrollar una interfaz de usuario móvil para la configuración remota del dispositivo; implementar mejoras constantes basadas en pruebas y retroalimentación y por último documentar el proceso de desarrollo para permitir la replicabilidad del proyecto.

La investigación de desarrollo tecnológico es clave para transformar las ideas en un producto tangible y útil.

Investigación Evaluativa

La investigación evaluativa se utilizó para medir la efectividad del sistema como herramienta educativa, para ello, se realizaron pruebas piloto en entornos educativos y de competencias para evaluar la usabilidad y el impacto del dispositivo, recopilando datos e información de retroalimentación de estudiantes y docentes sobre la experiencia de uso y, también, se identificaron áreas de mejora y ajustar el diseño en función de los resultados obtenidos.

Este tipo de investigación garantiza que el proyecto cumpla con su objetivo principal de facilitar el aprendizaje práctico en electrónica y robótica.

El proyecto combina múltiples tipos de investigación (aplicada, experimental, descriptiva, documental, de desarrollo tecnológico y evaluativa) para abordar de manera integral los aspectos técnicos y pedagógicos. Este enfoque multidisciplinario permite no solo desarrollar un prototipo funcional, sino también garantizar que sea una herramienta efectiva para la educación en electrónica y robótica.

3.1.2. Métodos teóricos de investigación

Los métodos teóricos de investigación son fundamentales para establecer las bases conceptuales, analizar información y guiar el desarrollo del sistema.

Análisis y Síntesis

Se realizó el estudio por separado de cada componente del sistema (control PID, sensores multiplexados, comunicación Bluetooth, turbina, etc.) para entender su funcionamiento individual.

Al integrar todos los componentes en un sistema funcional, se aseguró que trabajen y funcionen de manera coordinada.

Inducción-Deducción

Con este método se generaron conclusiones generales a partir de casos específicos (inducción) y luego se aplicaron los principios generales a situaciones concretas (deducción)

A partir de estas pruebas específicas con el control PID y los sensores, se concluyó de manera general como optimizar el seguimiento de la línea.

Se deduce que al aplicar los principios teóricos del control automático y la electrónica se puede diseñar el sistema y predecir su comportamiento.

Hipotético-Deductivo

Mediante la experimentación se formularon hipótesis y luego se procedió a validarlas mediante las pruebas.

Las hipótesis formuladas fueron:

- El ajuste de las constantes del PID mejorará la precisión del seguimiento.
- La potencia contralada de la turbina optimizará las velocidades máximas y la precisión en curvas del seguidor de línea.
- A mayor porcentaje de potencia del frenado (basado en la velocidad configurada) aumenta el riesgo de derrape en curvas.
- El diseño del chasis en forma de redes (mallas) reduce drásticamente el peso del seguidor sin comprometer la durabilidad del robot.
- La reducción del largo de un robot seguidor de línea, mejora el rendimiento en curvas, tanto cerradas como abiertas.
- El uso de configuración en tiempo real por medio de Bluetooth reduce significativamente el tiempo de configuración del seguidor de línea a su punto óptimo, ahorrando batería.

Luego se idearon experimentos para probar estas hipótesis y validar su veracidad y de esta forma ajustar el diseño en función de los resultados obtenidos.

Modelación

Se crearon representaciones simplificadas de sistemas complejos para analizar su comportamiento, por lo que se hizo un modelo matemático del sistema de control PID, incluyendo la dinámica del robot y la respuesta de los sensores.

Análisis Histórico-Lógico

Se investigó el desarrollo histórico de los seguidores de línea, el control PID y las tecnologías de comunicación Bluetooth e identificar tendencias y avances en la educación en electrónica y robótica. Eso permitió aprovechar lecciones aprendidas de prototipos anteriores para mejorar el diseño actual.

Enfoque Sistémico

Se estudió las interacciones entre los sensores, el control PID, la turbina y la comunicación Bluetooth para garantizar que el sistema funcione de manera coordinada y eficiente.

Además, de identificar y resolver problemas que surgieron de la integración y distribución de los componentes.

Análisis de Casos

Se analizaron otros seguidores de línea y sistemas de control PID implementados en contextos educativos para identificar soluciones exitosas y errores comunes en la integración de tecnologías como Bluetooth y sensores multiplexados y adaptar las mejores prácticas al diseño del proyecto.

Método Lógico-Abstracto

Se definieron conceptos clave como "control PID", "multiplexación de sensores" y "configuración remota" para establecer relaciones lógicas entre los componentes del sistema (por ejemplo, cómo la señal de los sensores afecta el control de los motores) y desarrollar algoritmos y flujos de trabajo basados en principios lógicos.

Los métodos teóricos de investigación utilizados en este proyecto proporcionan un marco sólido para el análisis, diseño y desarrollo del sistema. Estos métodos permiten comprender los fundamentos teóricos, predecir el comportamiento del sistema, integrar componentes de manera eficiente y validar las soluciones propuestas. Combinados con métodos prácticos y experimentales, garantizan que el proyecto sea tanto técnicamente robusto como pedagógicamente efectivo.

3.1.3. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Para el proyecto es fundamental utilizar técnicas e instrumentos de recolección de datos que permitan obtener información precisa y relevante tanto para el desarrollo técnico como para la validación educativa del sistema.

Pruebas de Funcionamiento y Experimentación

Técnicamente se realizó pruebas prácticas con el prototipo para evaluar su comportamiento en diferentes condiciones. Para ellos se utilizaron los siguientes instrumentos:

- **Pistas de prueba:** Superficies con líneas de diferentes formas (rectas, curvas, intersecciones) para evaluar el seguimiento de la línea.
- **Herramientas de medición:** Multímetros, osciloscopios y sensores adicionales para medir señales eléctricas y el rendimiento del sistema.
- **Software de monitoreo:** Programas como Arduino IDE para visualizar datos en tiempo real (por ejemplo, señales de los sensores y salidas del control PID).

Al aplicar las pruebas permitió recopilar datos sobre la precisión del seguimiento, la estabilidad del control PID y el rendimiento de la turbina.

Entrevistas

Se recolectaron opiniones y percepciones de los usuarios (estudiantes y docentes) sobre la usabilidad y efectividad del sistema como herramienta educativa, a través de entrevistas semi-estructuradas mediante diálogos con usuarios para obtener retroalimentación cualitativa y sugerencias de mejora.

Esto proporcionó la información sobre la experiencia del usuario y el impacto del proyecto en el aprendizaje.

Análisis de Datos en Tiempo Real

Se leyeron y analizaron los datos técnicos generados por el sistema durante su funcionamiento, por medio del monitor serial en Arduino IDE, para verificar el correcto funcionamiento de los sensores, motores y la turbina.

Esto permitió analizar el comportamiento del sistema, identificar patrones y optimizar parámetros.

Observación Directa

Se realizaron observaciones sistemáticas del comportamiento del robot y la interacción de los usuarios con el sistema, como la precisión del seguimiento, la respuesta del control PID y la facilidad de configuración y grabaciones de video para documentar pruebas y sesiones de uso, permitiendo un análisis posterior.

Esto proporcionó información detallada sobre el funcionamiento del sistema y la experiencia del usuario.

3.1.4. Tratamiento de la información

El tratamiento de la información se incluye la recopilación, análisis e interpretación de datos para garantizar que el sistema cumpla con sus objetivos técnicos y pedagógicos.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DEL PROYECTO TÉCNICO

El desarrollo del proyecto técnico representa la fase crucial donde se materializan los conceptos teóricos en un sistema funcional y eficiente. Este proceso abarca desde la concepción del diseño hasta la validación final del prototipo, pasando por la selección de componentes, la implementación de algoritmos de control, la integración de hardware y software, y la ejecución de pruebas exhaustivas para garantizar el cumplimiento de los objetivos planteados.

En este apartado, se detallan los aspectos técnicos más relevantes del proyecto, divididos en cuatro ejes principales: **Diseño de la Propuesta**, **Implementación**, **Pruebas** y **Resultados**. Cada uno de estos puntos se aborda con un enfoque metodológico, asegurando que el robot no solo cumpla con los requisitos funcionales, sino que también sirva como una herramienta educativa para fomentar el aprendizaje en electrónica, programación y robótica.

El **Diseño de la Propuesta** asienta las bases del proyecto, definiendo la arquitectura del sistema, la selección de componentes y la planificación de la lógica de control.

La **Implementación** se enfoca en la construcción física del robot, la programación del microcontrolador y la integración de todos los subsistemas.

Las **Pruebas** permiten validar el funcionamiento del robot bajo diferentes condiciones, mientras que los **Resultados** proporcionan un análisis cuantitativo y cualitativo del desempeño del sistema, así como recomendaciones para futuras mejoras.

Este desarrollo técnico no solo busca crear un robot funcional, sino también demostrar cómo la integración de tecnologías modernas, como el control PID, la comunicación inalámbrica y la fabricación digital (PCB personalizada y chasis 3D), puede aplicarse en proyectos educativos para inspirar a futuros ingenieros y entusiastas de la electrónica.

4.1. Diseño de la propuesta

4.1.1. Diseño Esquemático de Componentes

Se desarrolla un esquemático completo del circuito que incluye todas las conexiones entre los componentes.

El diseño esquemático de los componentes del robot seguidor de línea define de manera precisa las interconexiones entre los elementos clave del sistema, comenzando con los sensores infrarrojos que detectan la línea y se conectan al microcontrolador.

El microcontrolador, núcleo del sistema, establece conexiones de alimentación, tierra y comunicación mediante protocolos como I2C, SPI o UART, además de gestionar los pines de control para los motores DC y otros periféricos.

El módulo Bluetooth se enlaza al microcontrolador principalmente, a través de comunicación serial (UART), incorporando condensadores y resistencias para garantizar la estabilidad de la señal, mientras que los motores se integran al circuito mediante drivers como puentes H, cuyos pines de control son manejados por el microcontrolador para regular su velocidad y dirección.

Este esquemático no solo asegura la interconexión funcional de todos los componentes, sino que también sirve como base para el diseño de la placa PCB, optimizando el espacio y minimizando interferencias electromagnéticas, lo que resulta en un sistema compacto, eficiente y listo para su implementación.

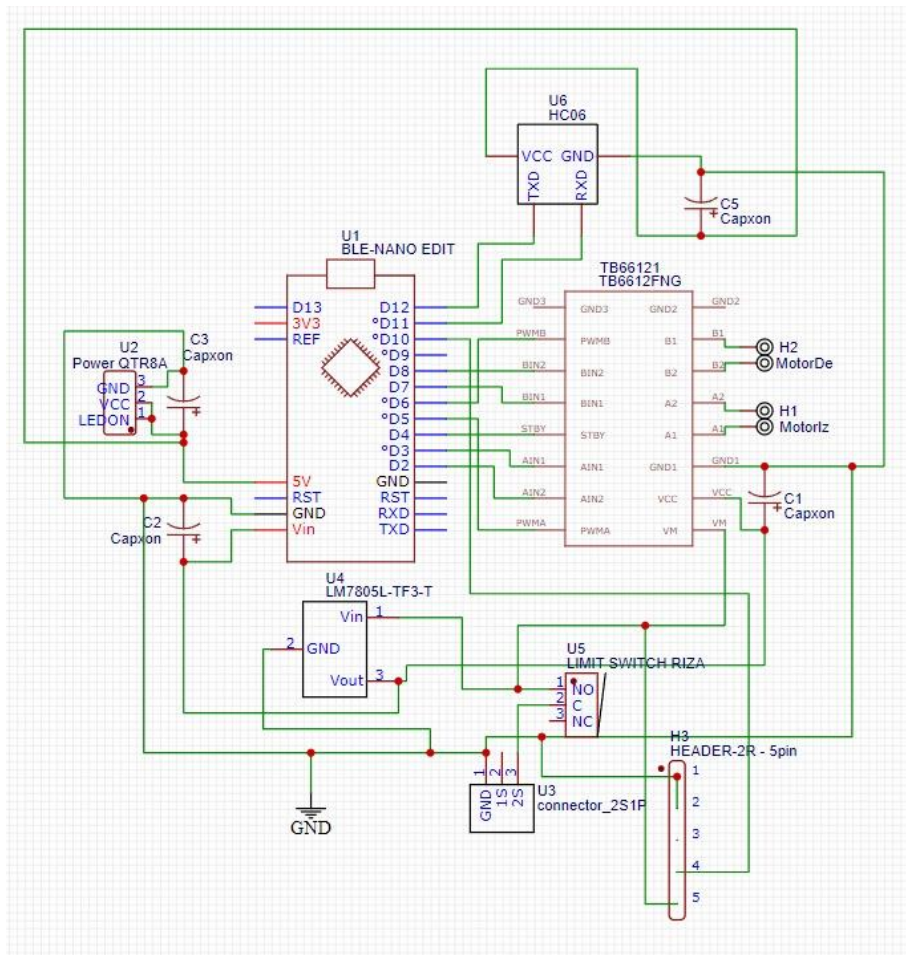


Figura 25. Diseño Final Esquemático de Componentes Fuente: José Tapia Velásquez (2025.)

4.1.2. Diseño del Chasis y Portamotores

Se diseña un chasis en 3D utilizando software de diseño CAD (Fusion 360) es ligero, resistente y permite la fácil integración de todos los componentes; incluye las dimensiones y los puntos de montaje para los componentes electrónicos y mecánicos.

De igual forma se diseña e imprime en 3D dos portamotores que ahorran espacio y mantienen aislados los motores para un funcionamiento más eficiente.

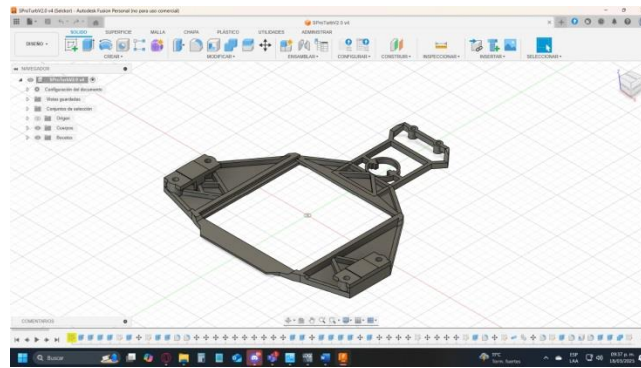


Figura 26. Diseño del Chasis en CAD Fusion 360. Fuente José Tapia Velásquez (2005.)

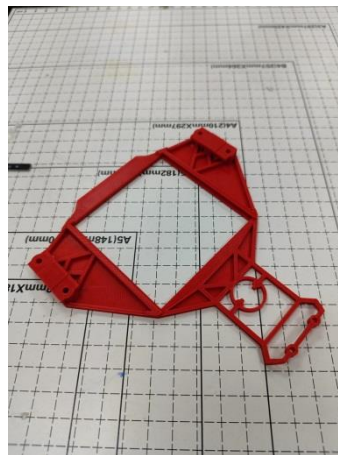


Figura 27. Chasis impreso en 3D con PLA. Fuente: José Tapia Velásquez (2025.)

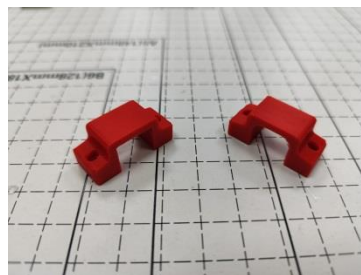


Figura 28. Portamotores impresos en 3D con PLA. Fuente: José Tapia Velásquez (2025.)

4.1.3. Diseño Placa PCB

Se diseña una placa PCB que integra todos los componentes electrónicos, incluyendo el microcontrolador, sensores, controladores de motores, y el módulo Bluetooth. Esto permite una mayor eficiencia en el espacio y una mejor organización del hardware.

Se utilizó software de diseño de PCB (EASYEDA) para crear el diseño de la placa, asegurando que todas las rutas estén correctamente trazadas y que se minimice el ruido eléctrico.

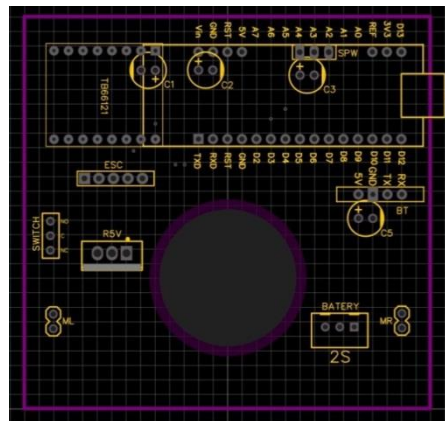


Figura 29. Diseño Huella Placa PCB. Fuente: José Tapia Velásquez (2025.)

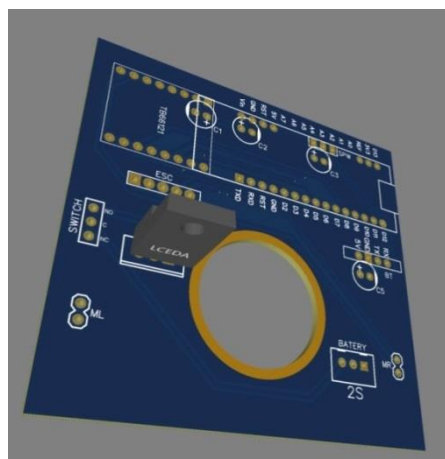


Figura 30. Diseño de Placa PCB en 3D con Fusion 360. Fuente: José Tapia Velásquez (2025.)

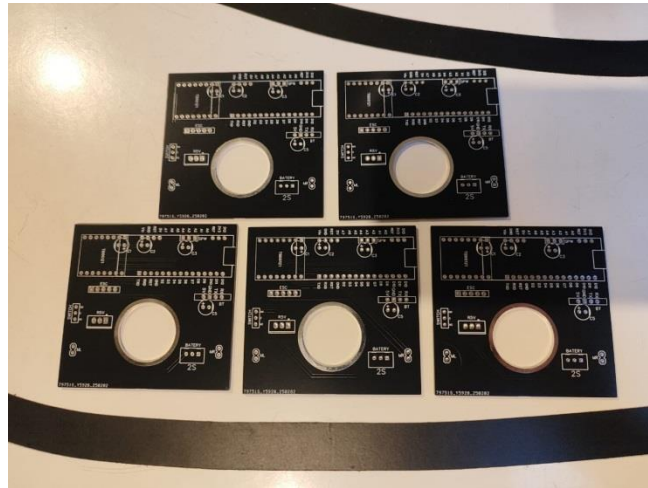


Figura 31. Placas PCB fabricadas. Fuente José Tapia Velásquez (2025.)

4.1.4. Comunicación Bluetooth

Se desarrolló un protocolo de comunicación Bluetooth que permite enviar y recibir datos entre el robot y un dispositivo externo. Esto incluye comandos para iniciar/detener el robot, ajustar parámetros del PID, y recibir datos de telemetría.

Se diseñó una interfaz de usuario en un dispositivo móvil o computadora que permite al usuario interactuar con el robot, visualizar datos en tiempo real y ajustar configuraciones.

4.2. Implementación

4.2.1. Lógica de Control PID

Se implementa un control PID para ajustar la velocidad de los motores en función de la posición del robot respecto a la línea. El algoritmo PID se encargará de minimizar el error entre la posición deseada y la posición actual.

Se realizó un proceso de sintonización para ajustar los parámetros del controlador (K_p , K_i , K_d) y asegurar un seguimiento suave y preciso de la línea.

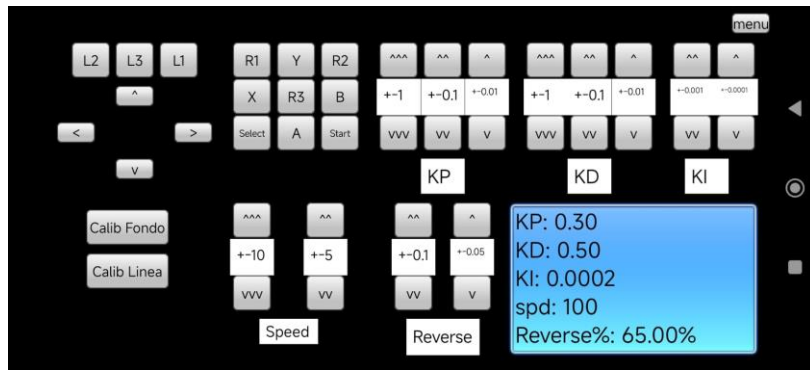


Figura 32. Implementación de Parámetros del Control PID. Fuente: José Tapia Velásquez (2025.)

El PID ajusta el movimiento del robot con base en el error entre la posición actual y la deseada. El cálculo básico del PID en el código sigue esta fórmula:

Tabla 1

Fórmula PID

Fórmula PID
$\text{Salida} = (K_p \times \text{Error}) + (K_i \times \text{Suma de errores}) + (K_d \times \text{Derivada del error})$
$\text{Salida} = (K_p \times \text{Error}) + (K_i \times \text{Suma de errores}) + (K_d \times \text{Derivada del error})$

Fuente: Elaborado José Tapia Velásquez (2025.)

Tabla 2***Implementación básica en código***

Implementación básica en código
<pre>float error, integral, derivada, salidaPID; float errorPrevio = 0; void calcularPID() { error = posicionLinea - setPoint; integral += error; derivada = error - errorPrevio; salidaPID = (Kp * error) + (Ki * integral) + (Kd * derivada); errorPrevio = error; }</pre>

Fuente: Elaborado José Tapia Velásquez (2025.)

En este caso, los valores de Kp, Ki y Kd se ajustan dinámicamente mediante Bluetooth y se almacenan en la memoria EEPROM.

4.2.2. Comunicación Bluetooth

Se desarrolla un protocolo de comunicación Bluetooth que permite enviar y recibir datos entre el robot y un dispositivo externo. Esto incluye comandos para iniciar/detener el robot, ajustar parámetros del PID, y recibir datos de telemetría.

Se diseñó una interfaz de usuario en un dispositivo móvil o computadora que permite al usuario interactuar con el robot, visualizar datos en tiempo real y ajustar configuraciones.

4.2.3. Ensamblaje del Chasis

Se procedió a montar los motores, sensores, PCB, y módulo Bluetooth en el chasis, asegurando que todos los componentes estén correctamente fijados y alineados.

4.2.4. Conexiones Electrónicas

Se sueldan los componentes en la PCB según el esquemático diseñado. Se realiza la conexión de los sensores de línea y los motores a la PCB, asegurando que todas las conexiones sean seguras y estén correctamente aisladas.

4.2.5. Códigos básicos para el control de la Turbina

La turbina utilizada para el prototipo es un modelo AEO Brushless ADF27MM Plus 10000KV; motor outrunner sin escobillas C05M 11000KV; diámetro interior 1.063 in; diámetro exterior 1.142 in; peso 0.28 oz, roto de 7 cuchillas.

La turbina se controla mediante la librería Servo, utilizando la función writeMicroseconds. Esto permite enviar señales precisas en un rango específico.

Tabla 3

Código básico para controlar la turbina

Código básico para controlar la turbina
<pre>#include <Servo.h> Servo turbina; void setup() { turbina.attach(pinTurbina); } void setTurbinaSpeed(int microsegundos) { turbina.writeMicroseconds(microsegundos); }</pre>

Fuente: Elaborado José Tapia Velásquez (2025.)

El rango típico es de 1000 μ s (mínima velocidad) a 2000 μ s (máxima velocidad). Estos valores se configuran también por Bluetooth.

4.2.6. Códigos básicos para manejar Multiplexación

La regleta multiplexada de 16 sensores es un modelo QRE1113 Reflectivos Multiplexados; 5V de alimentación; 120mA de corriente de consumo; tamaño exterior 135.12mm x 23.5mm, ancho de perforaciones 2.2mm y con un peso de 6gr.

En el código, los sensores se leen secuencialmente en grupos usando funciones específicas que permiten identificar la posición relativa de la línea y calcular el error.

El uso de una regleta de 16 sensores multiplexada implica activar y leer los sensores en grupos para optimizar el uso de pines.

Tabla 4

Código básico para manejar multiplexación

<i>Código básico para manejar multiplexación</i>
<pre>void seleccionarSensor(int grupo) { digitalWrite(muxControlPin1, grupo & 1); digitalWrite(muxControlPin2, (grupo >> 1) & 1); }</pre>

Fuente: Elaborado José Tapia Velásquez (2025.)

Esto permite leer varios sensores utilizando menos pines y mejorar el rendimiento del sistema.

Tabla 5

Tabla de Verdad Sensores Multiplexados

Sensor N°	Salidas hacia el arduino				Entradas desde multiplexor de sensores							
	D	C	B	A	a	b	c	d	e	f	g	
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	
6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	
10	1	0	1	0	X	X	X	X	X	X	X	
11	1	0	1	1	X	X	X	X	X	X	X	
12	1	1	0	0	X	X	X	X	X	X	X	
13	1	1	0	1	X	X	X	X	X	X	X	
14	1	1	1	0	X	X	X	X	X	X	X	
15	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	

Fuente: Elaborado José Tapia Velásquez (2025.)

Para el seguidor de línea se utiliza una tarjeta NANO V3.0 FTDI (ATMEGAS Genéricos) más cable USB, es una placa de desarrollo de tamaño compacto, completo y compatible con protoboards, basada en el microcontrolador ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales pueden ser usados con PWM), 6 entradas análogas, un cristal de 16Mhz, conexión Mini-USB, terminales para conexión ICSP y un botón de reseteo. Posee las capacidades que una tarjeta UNO, tanto en potencia del microcontrolador como en conectividad, solo se ve recortado en su conector USB, conector Jack de alimentación y los pines cambia un formato de pines header.

4.2.7. Almacenamiento EEPROM

La EEPROM del Arduino NANO permite guardar configuraciones que persisten después de apagar el dispositivo. Esto es crucial para mantener ajustes como constantes PID o velocidades de la turbina.

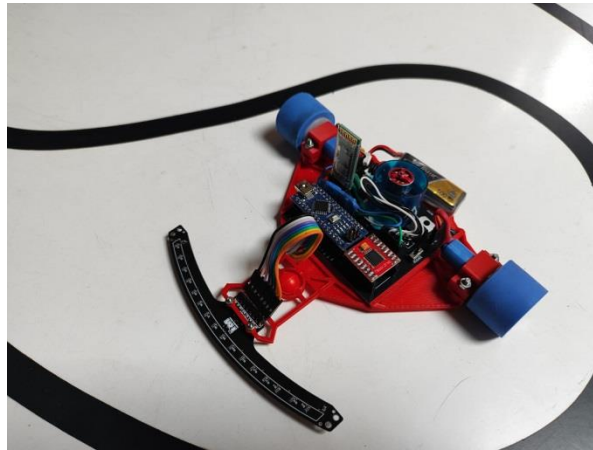


Figura 34. Ensamble del Robot Seguidor de Línea. Fuente José Tapia Velásquez (2025.)

4.3. Pruebas

Se realizaron pruebas unitarias de cada módulo del software (control PID, lectura de sensores, comunicación Bluetooth) para asegurar que funcionan correctamente de manera individual.

Una vez que cada módulo fue probado, se integraron todos los módulos en un único programa y se realizaron pruebas de integración.

4.3.1. Pruebas de Funcionalidad

Pruebas de Seguimiento de Línea: Se prueba el robot en superficies blancas con líneas negras para asegurar que el sistema de sensores y el control PID funcionan correctamente en diversas condiciones. Además, se realizan pruebas a diferentes velocidades para evaluar la capacidad del robot para mantener el seguimiento de la línea sin desviarse.

Pruebas de Comunicación Bluetooth; Se verifica que el robot pueda conectarse correctamente con un dispositivo externo a través de Bluetooth. Se prueba la capacidad del robot para recibir comandos y enviar datos de telemetría a través de Bluetooth.

4.3.2. Pruebas de Durabilidad

Se realiza pruebas de impacto para evaluar la resistencia del chasis y los componentes electrónicos.

Se somete el robot a vibraciones para asegurar que todas las conexiones y componentes permanezcan seguros y funcionales.

4.3.3. Pruebas de Estabilidad

Se realizan pruebas de funcionamiento continuo para evaluar la estabilidad del sistema a lo largo del tiempo.

Se prueba el robot en diferentes condiciones de temperatura para asegurar que los componentes electrónicos funcionen correctamente en un rango amplio de temperaturas.

Las pruebas se realizaron en una pista de competición y el prototipo se probó con turbina y sin turbina, comprobando su óptimo funcionamiento.

4.4. Resultados

El análisis de resultados y funcionamiento de los componentes del robot seguidor de línea confirma que el sistema cumple con los objetivos planteados, demostrando un desempeño óptimo y satisfactorio en todas las áreas evaluadas.

En cuanto al control PID, se observó una alta precisión en el seguimiento de la línea, con un error promedio mínimo y un tiempo de respuesta rápido que permite al robot corregir su posición de manera eficiente ante desviaciones, lo que garantiza un movimiento suave y estable.

La implementación del algoritmo PID, junto con la optimización de las constantes (K_p , K_i , K_d), aseguró un comportamiento dinámico y adaptable, cumpliendo con las expectativas de rendimiento en entornos variables.

Respecto a la comunicación Bluetooth, se midió una latencia baja en la transmisión de comandos desde el dispositivo externo al robot, lo que permite ajustes en tiempo real de parámetros como la velocidad y las constantes PID sin retrasos perceptibles. Además, la conexión Bluetooth demostró una alta fiabilidad, con una tasa de éxito elevada en la transmisión y recepción de datos, lo que facilita la interacción dinámica y la configuración remota del sistema.

El desempeño de los sensores infrarrojos multiplexados también fue óptimo, proporcionando una detección precisa y estable de la línea.

La integración de la placa PCB personalizada y el chasis impreso en 3D aseguró un ensamblaje funcional y robusto, permitiendo que todos los componentes operen de manera coordinada y eficiente.

En conjunto, estos resultados validan que el robot seguidor de línea cumple con los requisitos técnicos y educativos planteados, destacándose como una herramienta innovadora y efectiva para la enseñanza de conceptos avanzados en electrónica, robótica y control automático.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. La implementación del control PID, junto con la regleta de 16 sensores multiplexados, permitió un seguimiento de línea altamente preciso y estable. El sistema fue capaz de corregir desviaciones en tiempo real, minimizando el error y manteniendo una trayectoria suave incluso en curvas cerradas. La multiplexación de los sensores optimizó el uso de los pines del microcontrolador y mejoró la eficiencia en la lectura de datos.
2. La configuración de la turbina utilizando la librería Servo y el control en microsegundos permitió un ajuste fino y preciso de su posición. Esto fue fundamental para garantizar un flujo de aire controlado y consistente, lo que contribuyó al comportamiento estable del robot durante el seguimiento de la línea.
3. La implementación de la comunicación Bluetooth mediante RoboRemo permitió una interacción fluida y en tiempo real con el robot. Se pudieron ajustar parámetros como los valores del PID, la velocidad de los motores y la configuración de la turbina, lo que facilitó la optimización del comportamiento del robot durante las pruebas.
4. El uso de la memoria EEPROM del Arduino permitió almacenar de manera permanente los valores configurados, como los parámetros del PID y la configuración de la turbina. Esto aseguró que el robot mantuviera su configuración óptima incluso después de reiniciarse, lo que resultó en un funcionamiento consistente y confiable.
5. El diseño del robot, con su capacidad de ajuste dinámico de parámetros y su interfaz accesible, demostró ser una herramienta educativa efectiva. Se pudo interactuar con el

sistema, experimentar con diferentes configuraciones y observar directamente el impacto de sus ajustes en el comportamiento del robot.

6. La optimización dinámica del comportamiento del robot, basada en los datos de los sensores multiplexados, permitió una respuesta rápida y precisa a cambios en la pista. Esto resultó en un seguimiento de línea más eficiente y adaptable a diferentes condiciones.
7. La PCB personalizada demostró ser una solución eficiente y compacta para integrar todos los componentes electrónicos del robot. Su diseño optimizado permitió una conexión organizada y confiable, reduciendo el ruido eléctrico y facilitando el mantenimiento y las actualizaciones.
8. El chasis impreso en 3D cumplió con los requisitos de ser ligero, resistente y ergonómico. Su diseño permitió una integración óptima de los motores, la turbina, los sensores y la PCB, asegurando un ensamblaje preciso y funcional.
9. La integración de todos los módulos, incluyendo los motores, la turbina, los sensores y el sistema de alimentación, resultó en un robot funcional y estable. El diseño modular facilitó la instalación y el mantenimiento, mientras que la optimización del sistema de alimentación aseguró un funcionamiento eficiente y sin interrupciones.
10. El proyecto logró cumplir con todos sus objetivos específicos, demostrando que es posible diseñar y construir un robot seguidor de línea autónomo altamente eficiente y adaptable, utilizando tecnologías modernas como el control PID, la comunicación Bluetooth, la multiplexación de sensores, la fabricación de PCBs personalizadas y la impresión 3D. Además, su enfoque educativo lo convierte en una herramienta valiosa para la enseñanza de la electrónica y la robótica.

5.2. Recomendaciones

1. Para futuras versiones, se recomienda explorar la implementación de un sistema de auto-sintonización del PID, que permita ajustar automáticamente los valores de K_p , K_i y K_d en función de las condiciones de la pista, lo que mejoraría aún más la adaptabilidad del robot.
2. Se sugiere investigar el uso de motores con encoder para aplicaciones que requieran un control aún más detallado, especialmente en entornos con condiciones variables.
3. Para mejorar la experiencia, se recomienda desarrollar una aplicación móvil personalizada con una interfaz gráfica más intuitiva y la capacidad de visualizar datos en tiempo real, como la posición del robot y los valores de los sensores.
4. Se sugiere implementar un sistema de respaldo de configuraciones en un dispositivo externo (como una tarjeta SD) para permitir la recuperación de datos en caso de fallos en la EEPROM o para almacenar múltiples perfiles de configuración.
5. Se sugiere explorar la implementación de algoritmos de inteligencia artificial, como redes neuronales, para mejorar aún más la capacidad de toma de decisiones del robot en entornos complejos o con múltiples líneas.
6. Para futuras versiones, se recomienda incluir conectores modulares en la PCB para permitir la fácil expansión del sistema, como la adición de nuevos sensores o módulos de comunicación.
7. Se sugiere explorar el uso de materiales compuestos o de mayor resistencia para el chasis, especialmente si el robot será utilizado en entornos más exigentes o en competiciones de robótica.
8. Se recomienda implementar un sistema de monitoreo de la batería en tiempo real, que permita al usuario conocer el estado de carga y recibir alertas cuando sea necesario recargar, lo que mejoraría la autonomía y la confiabilidad del robot.

9. Para futuras iteraciones del proyecto, se recomienda enfocarse en la integración de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y la visión artificial, así como en la mejora de la modularidad y la sostenibilidad del diseño. Esto permitiría ampliar las aplicaciones del robot y mantenerlo a la vanguardia de la innovación en robótica educativa.

5.3. Referencias

Bibliografía

1. Murphy, R. R. (2019).
Introduction to AI Robotics (2nd ed.). MIT Press.
2. Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011).
Introduction to Autonomous Mobile Robots (2nd ed.). MIT Press.
3. Horowitz, P., & Hill, W. (2015).
The Art of Electronics (3rd ed.). Cambridge University Press.
4. Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2016).
Springer Handbook of Robotics (2nd ed.). Springer.
5. Bekey, G. A. (2005).
Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control. MIT Press.
6. Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2016).
Springer Handbook of Robotics (2nd ed.). Springer.
7. Patterson, D. A., & Hennessy, J. L. (2017).
Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface (5th ed.). Morgan Kaufmann.
8. Aström, K. J., & Hägglund, T. (2006).
Advanced PID Control. ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
9. Wilmshurst, T. (2010).
Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers: Principles and Applications (2nd ed.). Newnes.
10. Valvano, J. W. (2011).
Embedded Systems: Introduction to ARM Cortex-M Microcontrollers. Jonathan W. Valvano.

11. Scherz, P., & Monk, S. (2016).
***Practical Electronics for Inventors* (4th ed.). McGraw-Hill Education.**
12. Coombs, C. F. (2007).
***Printed Circuits Handbook* (6th ed.). McGraw-Hill Education**
13. Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004).
***Convex Optimization*. Cambridge University Press.**
14. McMichael, J. M., & Francis, M. S. (1997).
***Micro Air Vehicles - Toward a New Dimension in Flight*. DARPA.**

Videografías

- 1. VIDEO. HACER ROBOT SEGUIDOR DE LÍNEA VELOCISTA PROFESIONAL #10 "LECTURA DE SENSORES" SEGUIDOR DE LÍNEA ARDUINO.** TM-Robotic3D, 26 de septiembre de 2020.
Video de código para la lectura de la regleta de 16 sensores,
<https://youtu.be/iOanrURd6wA?si=JkhHo2wP0aotIlZz>
- 2. VÍDEO. LINE FOLLOWER CALIBRACION DE SENSORES #11 SEGUIDOR DE LÍNEA VELOCISTA.** TM-Robotic3D, 1 de octubre de 2020.
Video de código para la calibración de la regleta de 16 sensores,
https://youtu.be/z1_GP27yJHk?si=GkxY86qXpw5kan-p
- 3. BLOG JAPONÉS: DONDE SE VE EL SEGUIDOR DE LÍNEA CON TURBINA JAPONÉS**
<http://anikinonikki.cocolog-nifty.com/blog/2015/09/jet-cartisx04.html>
- 4. VÍDEO. ROBOMATRIX 2018 CATEGORÍA: SEGUIDOR DE LÍNEA.** Mini Robótica UTCH, 10 de diciembre de 2018.
Torneo de seguidores de línea con turbina y sin turbina México,
https://youtu.be/db6oKIfeocs?si=1HnjW_HivhchlV_O
- 5. VIDEO. ALL JAPAN MICROMOUSE CONTEST ROBOTRACER CARTISX04 RUN.** Aniki Hirai, Dec 29, 2014
Seguidor de línea japonés
<https://youtu.be/mBZU9S0kZJw?si=9lByVlXH7oETDxiY>
- 6. VIDEO. PRUEBA SEGUIDOR DE LÍNEA TURB SELCK 2.0.** Selckor, 18 de marzo de 2025.
Prototipo primeras versiones.
<https://www.youtube.com/watch?v=KGk7xRjAjK8>

ANEXOS

ANEXO 1. CUADRO CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DEL PROYECTO

N°	Actividad	Descripción	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				Responsable
			S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	
1	Investigación y Planificación	Revisión bibliográfica, definición de requisitos y objetivos del proyecto																	José Tapia Velásquez
2	Selección de Componentes	Selección de sensores, microcontrolador, motores, y otros componentes electrónicos.																	José Tapia Velásquez
3	Diseño Esquemático	Creación del esquemático del circuito electrónico.																	José Tapia Velásquez
4	Creación de la Placa PCB	Diseño del lay out de la PCB y fabricación																	José Tapia Velásquez
5	Creación del Chasis (Diseño 3D):	Diseño del chasis utilizando software CAD.																	José Tapia Velásquez
6	Creación del Chasis (Impresión 3D):	Impresión 3D del chasis																	José Tapia Velásquez
7	Programación del Control PID	Desarrollo y calibración del algoritmo PID.																	José Tapia Velásquez
8	Implementación de Comunicación Bluetooth	Programación de la comunicación Bluetooth.																	José Tapia Velásquez
9	Desarrollo del Algoritmo de Seguimiento de Línea:	Programación del algoritmo de seguimiento.																	José Tapia Velásquez
10	Ensamblaje	Conexión de componentes electrónicos, montaje de la PCB y ensamblaje del chasis.																	José Tapia Velásquez
11	Pruebas Iniciales	Pruebas de funcionalidad básica (seguimiento de línea, control PID).																	José Tapia Velásquez
12	Correcciones de Fallos	Identificación y corrección de fallos en hardware y software.																	José Tapia Velásquez
13	Pruebas de Rendimiento	Pruebas de precisión, tiempo de respuesta y consumo energético																	José Tapia Velásquez
14	Optimización Dinámica	Ajuste de parámetros del control PID y optimización del sistema																	José Tapia Velásquez
15	Aprobación del Prototipo	Evaluación final y aprobación del prototipo.																	José Tapia Velásquez
16	Documentación y Presentación	Elaboración de tesis de grado y presentación final de vídeos del proyecto																	José Tapia Velásquez

Fuente: Elaborado por José Tapia Velásquez, Marzo, 2025

ANEXO 2. CUADRO PRESUPUESTO DETALLADO DEL PROYECTO

Ítem	Descripción	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Arduino NANO V3.FTDI	Atmegas Genérico + Cable USB.	1	\$9,99	\$9.99
Kit 40 Cables Arduino	10 cm de longitud macho-hembra Dupont-Jumper- Arduino	1	\$1.49	\$1.49
Batería LIPO 2S 7,6 V	300MAH TATTU 75C PHR Plug	1	\$14.99	\$14.99
Capacitor Cerámico 104	100V 100nF	4	\$0.05	\$0.20
Controlador Dual de Motores	TB6612FNG Puente H	1	\$5.99	\$5.99
Espadines Rectos Hembra	40 Pines 2.0MM	1	\$0.40	\$0.40
Espadines Rectos Macho	40 Pines 2,0MM.	1	\$0.30	\$0.30
Espadines en Ángulo Macho	40 Pines 2,54MM	1	\$0.25	\$0.25
Interruptor Deslizable	SS-12D00G3 3 Pines 2 POS SPDT	1	\$0,25	\$0.25
Llantas Minisumo	Velocista de alta calidad y agarre	1	\$6.98	\$6.98
Micro Motorreductor	Pololu 10:1 6V HP eje Extendido	2	\$23.99	\$47.98
Módulo Bluetooth	HC-05 para Arduino	1	\$9,99	\$9.99
Motor Brushless	ESC 20A BLHELI-S HSKPC	1	\$22.99	\$22.99
Módulo Regleta 16 Sensores	QRE1113 Reflectivos Multiplexados	1	\$62.99	\$62.99
Regulador de Voltaje	LM7805CV TQ-220	1	\$0.50	\$0.50
Turbina AEO	Brushless, ADF27MM Plus 10000KV	1	\$59.99	\$59.99
Impresión Chasis	Completo en 3D	1	\$15.00	\$15.00
Aplicación Robo Remo	Software de configuración y ajuste Placa PCB	1	\$10.00	\$10.00
Placa PCB	Profesional importada	5	\$7.00	\$35.00
Transporte y Logística	Costos de envío de componentes y materiales.	1	\$30.00	\$30.00
Contingencias	Presupuesto adicional para imprevistos.	1	\$30.00	\$30.00
Total				\$365.28

El Presupuesto Total del Proyecto es de **USD 365,28** (Trescientos sesenta y cinco 28/100 dólares americanos)

Fuente: Elaborado por José Tapia Velásquez, Marzo, 2025