

Desarrollo de un Prototipo de Carro RC con Control Remoto y Telemetría mediante Comunicación Digital Inalámbrica

Universidad Militar Nueva Granada

Jorge Andres Obando Romero

Brayan David Daza Torres

Valentina Hernández Morales

Miguel Andrey Peña Cardenas

Resumen— Este proyecto consiste en el diseño e implementación de un sistema de telemetría inalámbrica para un carro a control remoto, aplicando los conceptos aprendidos en la materia de Comunicaciones Digitales. El sistema se construyó usando un microcontrolador Raspberry Pi Pico 2W, un transceptor nRF24L01 y un conjunto de sensores como GPS, IMU, sensor de línea y medición de batería. Se desarrolló un enlace inalámbrico bidireccional para enviar datos en tiempo real desde el carro hacia una estación de telemetría en PC, donde los valores se visualizan y almacenan en un archivo CSV para su análisis posterior. El informe presenta el diseño mecánico y electrónico, la programación del firmware, pruebas con analizador lógico y osciloscopio, los resultados en la pista de carrera y la integración del sistema de comunicación digital, control y visualización

Abstract-- This project presents the design and implementation of a wireless telemetry system for a remote-controlled car, applying the concepts learned in the Digital Communications course. The system is based on a Raspberry Pi Pico 2W microcontroller, an nRF24L01 transceiver, and a set of required onboard sensors such as GPS, IMU, battery level, and line detection sensor. A bidirectional wireless link was developed to transmit real-time data from the car to a PC telemetry station, where the information is displayed and saved in a CSV file for later analysis. This report includes the mechanical and electronic design, firmware programming, laboratory testing (oscilloscope and logic analyzer), race performance results, and the integration of digital communication, control and visualization modules

Introducción

La comunicación digital permite el envío de información en forma de bits mediante un canal físico o inalámbrico, garantizando confiabilidad y eficiencia en la transmisión. En este proyecto se aplican estos conceptos para construir un carro de telemetría, capaz de enviar datos en tiempo real sobre su posición, movimiento y estado interno.

El reto principal consiste en integrar hardware, software y comunicaciones digitales reales, empleando un diseño funcional con PCB propia y diferentes sensores. Además, se debe demostrar el funcionamiento en laboratorio y en la pista de carreras, analizando el desempeño del enlace inalámbrico en la banda ISM de 2.4–2.5 GHz, zona donde también operan redes Wi-Fi y Bluetooth, lo que exige una correcta gestión del canal asignado para evitar interferencias. Este trabajo busca fortalecer la comprensión del protocolo I2C

a nivel práctico, relacionando los conceptos teóricos con la captura de señales reales y la interpretación de los datos .

OBJETIVOS

Diseñar, implementar y sustentar técnicamente un sistema de telemetría inalámbrica para un carro a control remoto, aplicando conceptos de comunicaciones digitales, integración de sensores, control de actuadores y visualización de datos en tiempo real.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un enlace inalámbrico usando Raspberry Pi Pico 2W + nRF24L01.
- Integrar sensores: GPS, IMU, sensor de línea, temperatura del motor y nivel de batería.
- Programar una estación de telemetría en PC para visualizar los datos y generar un archivo CSV.
- Realizar pruebas con analizador de espectro, osciloscopio y analizador lógico para validar el enlace.
- Analizar los resultados obtenidos en la pista de carrera y comparar el desempeño técnico del diseño.

I. DESARROLLO

El desarrollo del proyecto se abordó desde dos perspectivas complementarias: hardware (diseño físico y electrónico) y software (lógica de control, comunicación y telemetría). Ambos componentes interactúan para implementar un sistema funcional de adquisición, transmisión, visualización y control en tiempo real, cumpliendo con los requisitos establecidos en la guía del proyecto.

La arquitectura se diseñó bajo un enfoque modular, separando claramente los siguientes bloques funcionales:

- **Módulo de adquisición de datos (sensores a bordo).** Encargado de medir variables físicas: posición (GPS), orientación y aceleración (IMU), nivel de batería, temperatura del motor y detección de línea de meta.
- **Módulo de control y procesamiento (Raspberry Pi Pico 2W).** Recibe los datos de los sensores, los organiza en

estructuras de datos, aplica la lógica de control del carro y genera los paquetes de telemetría.

- Módulo de radio (nRF24L01).** Implementa el enlace inalámbrico en 2.4 GHz, enviando y recibiendo paquetes de datos entre el carro y la estación de control.
- Módulo de actuadores.** Controla el movimiento del vehículo mediante un servomotor para la dirección y un ESC (Electronic Speed Controller) para el motor DC.
- Estación de telemetría en PC.** Recibe los paquetes, los decodifica y presenta la información en tiempo real, además de guardar un archivo CSV con los datos registrados durante la carrera, cumpliendo el requisito de la guía.

Esta organización permitió implementar una cadena completa de comunicaciones digitales: desde la captura de datos en el carro, pasando por la transmisión inalámbrica, hasta la visualización y análisis en el computador.

II. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN E INTEGRACIÓN DEL CARRO (HARDWARE)

El desarrollo del vehículo comenzó con la selección e integración física de cada componente electrónico. El objetivo fue crear una plataforma robusta, ordenada y compatible con los protocolos digitales de comunicación.

Pasos realizados:

- Selección del chasis y fuente de energía. Se definió un chasis compatible con la Raspberry Pi Pico, batería y actuadores. Se seleccionó la batería adecuada según capacidad, voltaje y seguridad eléctrica.

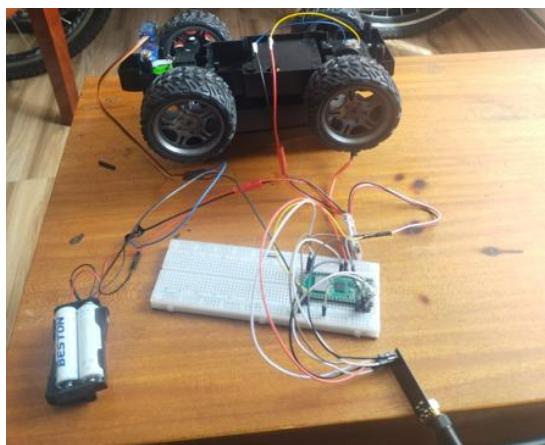


Imagen 1. Primer montaje del carro

- Montaje de la Raspberry Pi Pico 2W como unidad central. La Pico se instaló como cerebro del sistema. Se asignaron pines de acuerdo con la distribución física del carro para reducir interferencias y facilitar el cableado, se puede observar en el esquemático.

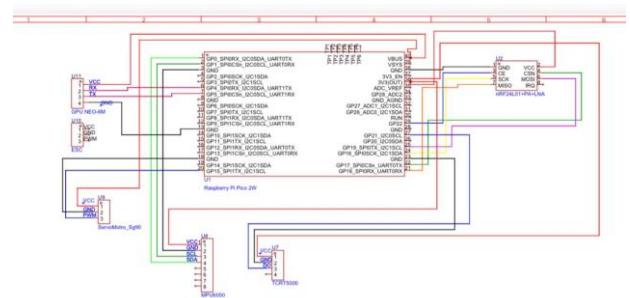


Imagen 2. Esquemático del montaje del carro

- Conexión del módulo nRF24L01 (radio principal). Se ubicó en una zona elevada o aislada para reducir ruido y mejorar la recepción de señal. Se implementó el protocolo SPI mediante cableado directo:

Pin Pico	Función SPI	Módulo
GP6	SCK	nRF24L01
GP7	MOSI	Pico → Radio
GP4	MISO	Radio → Pico
GP15	CSN	Habilitar dispositivo
GP14	CE	Activar transmisión Tx/Rx

Tabla 1. Prueba de conexiones para el montaje del carro

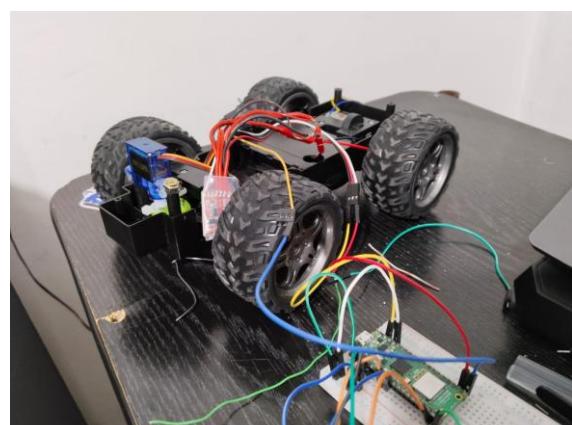


Imagen 3. Prueba de conexiones para el montaje del carro

Instalación de sensores del carro

El vehículo integra diferentes sensores que permiten medir su estado interno y su comportamiento dinámico mientras está en funcionamiento. Cada sensor utiliza un protocolo digital diferente y cumple una función específica dentro del sistema de comunicaciones y telemetría.

Sensor	Protocolo	Pines usados	Propósito
GPS	UART	GP0 / GP1	Ubicación, velocidad
IMU MPU6050	I2C	GP8 / GP9	Aceleración y giro
Voltaje batería	ADC	GP26	Seguridad y autonomía
Sensor línea	Digital	GP20	Paso por meta
Temp. motor	ADC/I2C	Según modelo	Prevención de daño

Tabla 2. Conexiones de telemetría

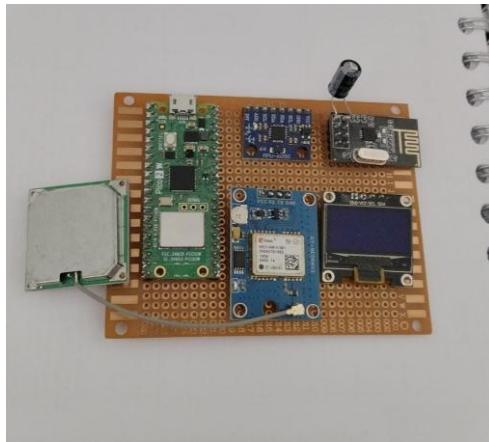


Imagen 4. Sensores del carro

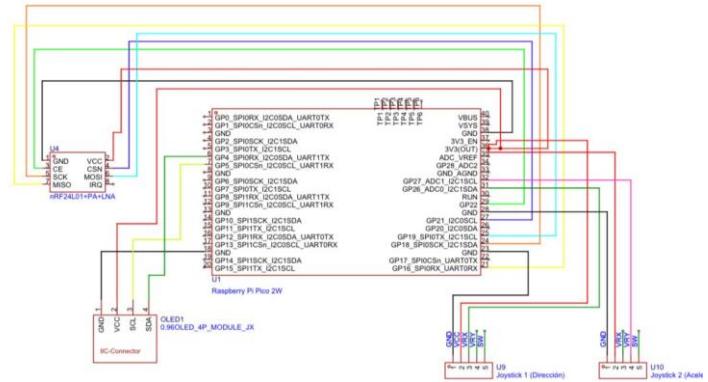


Imagen 5. Esquemático montaje del control remoto

III. CONSTRUCCIÓN DEL CONTROL REMOTO Y ENLACE DE COMUNICACIÓN

El control remoto se implementó usando una Raspberry Pi Pico como unidad principal, dos joysticks analógicos como interfaz de usuario, un módulo NRF24L01 como enlace de radio y una pantalla OLED I2C para visualización local de los comandos enviados.

El objetivo de este módulo es generar, visualizar y transmitir en tiempo real las órdenes de dirección y aceleración hacia el carro receptor. El control fue diseñado para actuar como nodo transmisor (TX) del sistema, enviando los comandos hacia el carro, que funciona como receptor (RX).

Arquitectura general del control

El control remoto está formado por los siguientes bloques:

- Unidad de procesamiento: Raspberry Pi Pico
- Entrada del usuario:
 - Joystick 1 → Dirección (giro del servo)
 - Joystick 2 → Velocidad (ESC del motor)
- Comunicación inalámbrica: Módulo NRF24L01 en modo TX
- Retroalimentación visual: Pantalla OLED SSD1306 por I2C
- Alimentación: 5V/USB (Pico) y 3V3 generados por el regulador de la Pico para alimentar el OLED y el NRF24L01

Toda la lógica (lectura de joysticks, empaquetado de datos, envío y actualización de pantalla) se ejecuta en un bucle principal en MicroPython.

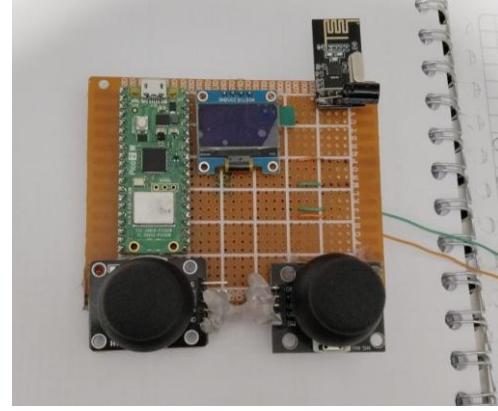


Imagen 6. montaje del control remoto

Pruebas y verificación de funcionamiento del control

Para validar el control remoto se realizaron las siguientes pruebas:

1. Prueba estática solo con control:
 - Se alimentó la Pico del control por USB.
 - Se verificó en la pantalla OLED que la lectura de joysticks cambiaba al moverlos.
 - Se aseguró que el rango variaba de aproximadamente 0 a 65535.
2. Prueba de enlace con el receptor:
 - Se encendió el carro (Pico receptor + servo + ESC).
 - Se observó en la pantalla del receptor y en los actuadores:
 - El servo giraba suavemente al mover el joystick de dirección.
 - El motor cambiaba de velocidad/sentido con el joystick de aceleración.
3. Prueba de alcance:
 - Se alejaba el control del carro mientras se observaba la respuesta.
 - Se logró control estable dentro del rango de operación del NRF24L01 (dependiendo del entorno).

Conclusión de la parte del control remoto

El control remoto desarrollado:

- Proporciona una interfaz intuitiva basada en dos

joysticks analógicos.

- Envía en tiempo real las órdenes de dirección y velocidad usando el módulo NRF24L01.
- Utiliza un protocolo de comunicación sencillo (dos valores de 16 bits) que facilita el procesamiento en el receptor.
- Incluye una pantalla OLED que permite verificar localmente las órdenes enviadas, facilitando la depuración y la experiencia de uso.

En conjunto, este módulo actúa como el "volante y acelerador inalámbrico" del sistema, integrándose de forma robusta con el receptor montado en el vehículo.

IV. Módulo de Telemetría

Una vez establecida la comunicación del control, se añadió la telemetría. En esta etapa del proyecto se desarrolló un sistema de telemetría inalámbrica en tiempo real, encargado de enviar los datos de los sensores instalados en el carro hacia una estación base conectada al computador. La telemetría del vehículo consiste en transmitir información desde el carro hacia una estación en PC, utilizando protocolos de comunicación digital y un transceptor inalámbrico nRF24L01, operando en la banda de 2.4 GHz. El objetivo es monitorear variables físicas del sistema mientras el carro se encuentra en movimiento y registrar los datos para análisis posterior.

La telemetría permite que el carro no solo reciba comandos, sino que también responda informando en tiempo real su estado interno, lo que representa una comunicación bidireccional.

Lectura de sensores (software en Pico RX)

Este diagrama muestra todo el proceso de comunicación digital del sistema. Los sensores toman datos reales del carro y se digitalizan por protocolos como I2C, UART y ADC. Luego la Raspberry Pi Pico los organiza dentro de un paquete de 32 bytes, que se envía por SPI al nRF24L01. El radio modula en GFSK y transmite la señal por el aire en 2.4 GHz. El receptor la recibe y la envía al PC, donde se visualiza y se guarda en un archivo CSV para análisis. En otras palabras: el carro no solo recibe comandos, también reporta su estado en tiempo real

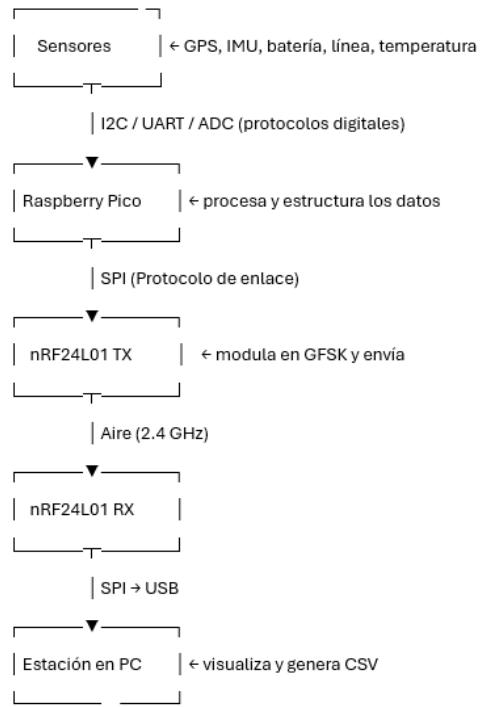


Imagen 7. Diagrama de comunicación del sistema

Estructura de la trama de telemetría (32 bytes)

El módulo nRF24L01 tiene un límite físico de 32 bytes por paquete, definido en su datasheet. Por eso estructuramos los datos en un frame fijo que cumple ese tamaño. Para lograrlo empaquetamos las variables de los sensores usando estructuras binarias. Eso garantiza transmisión rápida, menor latencia y compatibilidad directa con el protocolo interno del radio

Bytes	Datos
0	ID paquete
1	Estado del control
2-3	Voltaje batería
4-7	Temp. motor + sensor meta
8-13	IMU (XYZ accel)
14-19	IMU (XYZ giroscopio)
20-27	GPS (latitud y longitud)
28-31	CRC / verificación

Tabla 3. Datos empaquetados

Transmisión mediante SPI + GFSK

La Pico envía los 32 bytes al nRF24L01 usando SPI, luego el chip modula la señal con GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) el cual se transmite por 2.4 GHz, usando el canal asignado por el profesor, también se usa ACK automático entonces si el paquete falla, se reenvía.

La siguiente imagen corresponde a la interfaz de telemetría utilizada para visualizar en tiempo real los datos enviados desde el carro mediante el transceptor nRF24L01. La comunicación se realizó en la banda ISM de 2.4 GHz, con un payload de 32 bytes, utilizando el protocolo definido en la sección 4.3 del informe.

Esta interfaz permite monitorear continuamente los sensores a bordo y verificar el comportamiento del sistema embebido durante el movimiento del vehículo.

```

File Session Edit Connection Macros View Remote Window Help
New Open Save Connect Disconnect Options Clear Data View Help
LINE | AX | AY | AZ
0 | -572 | -356 | 16028
LAT = 0.000000 | LON = 0.000000

LINE | AX | AY | AZ
0 | -564 | -324 | 16104
LAT = 0.000000 | LON = 0.000000

LINE | AX | AY | AZ
0 | -644 | -360 | 16072
LAT = 0.000000 | LON = 0.000000

LINE | AX | AY | AZ
0 | -568 | -380 | 16152
LAT = 0.000000 | LON = 0.000000

LINE | AX | AY | AZ
0 | -580 | -308 | 16212
LAT = 0.000000 | LON = 0.000000

LINE | AX | AY | AZ
0 | -616 | -332 | 15984
LAT = 0.000000 | LON = 0.000000

COM8 (USB SERIAL CH340) / 115200 B-N-1
Connected 00:00:34, 6437 / 0 bytes

```

Imagen 8. Imagen de la interfaz para visualizar el envío de datos

Dato mostrado	Significado
LINE	Estado del sensor de línea/meta (0 = no detectado, 1 = detectado)
AX, AY, AZ	Datos de aceleración en los tres ejes del IMU MPU6050
LAT, LON	Lectura del GPS (en este caso aún no hay fix real)

Tabla 4. interpretación de datos enviados de los sensores

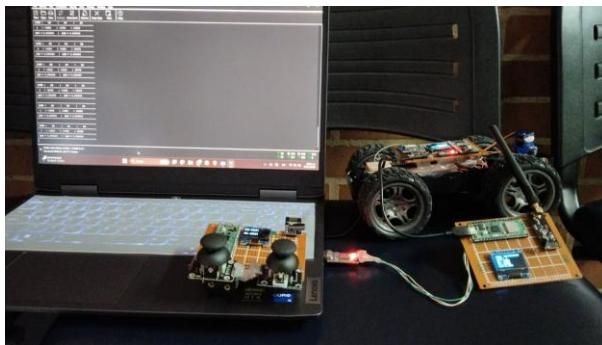
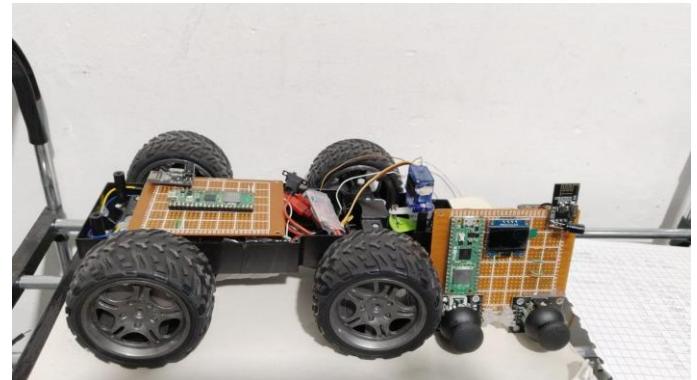


Imagen 9. Sistema integrado

V. RESULTADOS

Funcionamiento general del sistema



El vehículo fue ensamblado, cableado y configurado completamente, integrando con éxito los módulos de control, telemetría inalámbrica, sensores a bordo y actuadores PWM. El sistema cumplió con el objetivo principal: realizar una comunicación bidireccional real entre el control remoto y el carro, mientras el carro envía datos en tiempo real hacia la estación de telemetría en PC.

Pruebas del control inalámbrico

Durante las pruebas iniciales se verificó la comunicación TX/RX utilizando el nRF24L01. Se comprobó que los comandos digitales (dirección y velocidad) eran recibidos sin retraso perceptible y con baja latencia.



Proceso de Diseño Asistido por IA Herramientas Software de la guía del proyecto.

Durante el desarrollo del sistema se utilizaron herramientas de Inteligencia Artificial (IA) como apoyo técnico y de documentación. La IA se empleó de forma responsable, evitando que resuelva completamente el problema, pero sí

optimizando el diseño, la programación y el análisis conceptual.

Objetivo del uso de IA

Acelerar la búsqueda técnica sobre protocolos de comunicación, optimizar el código del nRF24L01 para evitar errores de sincronización, generar mejoras en la estructura del payload de telemetría. Redactar fragmentos del informe técnico en formato formal y técnico, guiar la integración de sensores con protocolos SPI, I2C y UART.

- [5] Microchip Technology, "PWM Techniques for Motor Control," App Note AN538, 2016.
- [6] J. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed., McGraw-Hill, 2014.
- [7] S. Haykin, *Communication Systems*, 5th ed., Wiley, 2009.
- [8] H. Taub and D. Schilling, *Principles of Communication Systems*, McGraw-Hill, 2011.
- [9] UMNG, "RC Cars Telemetry Challenge 2025 – Guía del proyecto," 2025.
- [10] Random Nerd Tutorials, "Interfacing Raspberry Pi Pico with MPU6050," 2023. [Online].

Herramientas utilizadas

- ChatGPT Estructura de código y documentación técnica
- GitHub Copilot Autocompletar código y evitar errores de sintaxis
- Lovable Código de la interfaz

Conclusiones Finales del Proyecto

- El sistema logró integrar comunicación digital, control en tiempo real y telemetría inalámbrica, demostrando que los conceptos de la materia pueden trasladarse a un escenario real de ingeniería aplicado.
- La arquitectura modular permitió combinar protocolos digitales (I2C, UART, ADC, PWM y SPI) con modulación GFSK para transmisión por radiofrecuencia en la banda ISM de 2.4 GHz, respetando las reglas de espectro indicadas por el docente.
- Se comprobó que el límite de 32 bytes del módulo nRF24L01 obliga a estructurar una trama de telemetría compacta y eficiente, lo cual representa un ejemplo real de optimización de datos y diseño digital eficiente.
- La estación de telemetría en PC permitió recibir, visualizar y guardar los datos en CSV, generando información útil para analizar el comportamiento del carro durante la carrera.
- El sistema final funciona como una plataforma de adquisición y análisis de datos móviles, lo que abre posibilidades reales para sistemas autónomos, control automático y ampliaciones futuras como detección de obstáculos o seguimiento de ruta.
- El proyecto mostró que comunicaciones digitales no es solo teoría, sino una herramienta potente para diseñar soluciones tecnológicas concretas.

REFERENCIAS

- [1] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi Pico 2W Datasheet," 2024.
- [2] Nordic Semiconductor, "nRF24L01 2.4 GHz RF Transceiver," Datasheet, 2023.
- [3] InvenSense, "MPU-6050 MotionTracking Device," Datasheet, 2023.
- [4] SparkFun Electronics, "TCRT5000 Sensor User Guide," 2022.