

Informe VIII – Implementación de Enlace Inalámbrico Punto a Punto con NRF24L01 y Raspberry Pi Pico 2W

Dylan Ferney Vasquez Rojas
1401597
Comunicaciones Digitales

DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Resumen— Este informe presenta el diseño e implementación de un sistema inalámbrico punto-punto empleando módulos transceptores NRF24L01 y microcontroladores Raspberry Pi Pico 2W. El sistema permite controlar remotamente un servomotor y visualizar en tiempo real el ángulo transmitido tanto en el nodo del receptor (RX) mediante una pantalla OLED. Además, se realiza la selección del canal de operación mediante análisis del espectro radioeléctrico en la banda ISM 2.4–2.5 GHz.

Abstract— This report presents the design and implementation of a point-to-point wireless system using NRF24L01 transceiver modules and Raspberry Pi Pico 2W microcontrollers. The system allows remote control of a servomotor and real-time visualization of the transmitted angle at both the receiving (RX) nodes using an OLED display. Furthermore, the operating channel is selected by analyzing the radio spectrum in the 2.4–2.5 GHz ISM band.

I. INTRODUCCIÓN

En los sistemas modernos de control remoto y telemetría, la transmisión inalámbrica confiable y de baja latencia es un factor crítico para garantizar un desempeño eficiente. En este contexto, los módulos NRF24L01 operando en la banda ISM de 2.4–2.5 GHz ofrecen una solución económica y de bajo consumo energético para enlaces punto-punto. Por su parte, la Raspberry Pi Pico 2W integra conectividad inalámbrica nativa y capacidades de procesamiento adecuadas para la adquisición y envío de datos en tiempo real.

Este proyecto implementa un enlace inalámbrico bidireccional entre dos nodos embebidos, donde el nodo transmisor captura datos desde un joystick y un acelerómetro MPU6050 para generar un ángulo de control, el cual es enviado mediante el NRF24L01 hacia el nodo receptor. Este último controla un servomotor y muestra la información recibida en una pantalla OLED. Asimismo, se visualiza el ángulo en el nodo transmisor, garantizando una retroalimentación inmediata al usuario. Finalmente, se realiza la selección del canal de operación mediante análisis del espectro radioeléctrico para evitar interferencias en la banda ISM.

El presente informe documenta el diseño del sistema, su implementación física y lógica, los resultados obtenidos en las pruebas de comunicación y el análisis del comportamiento del enlace inalámbrico.

El desarrollo de la práctica se dividió en dos módulos principales: el nodo transmisor (TX) y el nodo receptor (RX). Ambos fueron implementados utilizando la Raspberry Pi Pico 2W como unidad de procesamiento central, el transceptor inalámbrico NRF24L01 como medio de comunicación punto-punto y dispositivos periféricos para entrada y salida de datos.

El procedimiento consistió en tomar la muestra de 16 bits correspondiente al eje X del acelerómetro y segmentarla en cuatro bloques de 4 bits. Cada bloque fue codificado con el esquema Hamming (7,4) usando paridad par, lo que produjo una palabra de 7 bits por bloque. De esta manera, la muestra final quedó representada en una trama de 28 bits (concatenación de los bloques D', C', B' y A').

I. Nodo Transmisor (TX)

El código del transmisor configura inicialmente la comunicación SPI con el NRF24L01 para habilitar el enlace inalámbrico. Se define el canal 90, una potencia de transmisión alta (0 dBm) y un tamaño de carga útil de 32 bytes. Posteriormente, se establece la dirección de transmisión y recepción para garantizar una comunicación exclusiva con el nodo RX.

Se utiliza el protocolo I2C para inicializar y leer el acelerómetro MPU6050, obteniendo los valores de aceleración en los ejes X, Y y Z. Paralelamente, se configura el joystick mediante entradas analógicas (ADC) y la lectura del eje X se mapea a un ángulo entre 0° y 180°.

En el bucle principal, el sistema toma las lecturas del acelerómetro y el joystick, construye un mensaje en formato texto del tipo: ACC,Ax,Ay,Az,SERVO,Ángulo, y lo envía inalámbricamente mediante `nrf.send()`. Este envío ocurre cada milisegundo, logrando control en tiempo real.

TX

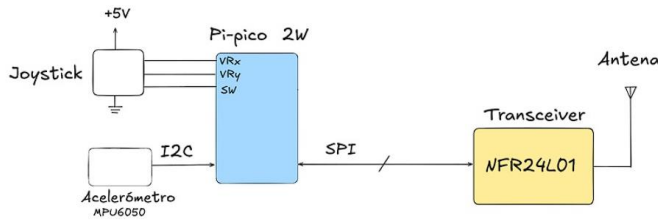


Ilustración. 1. Diagrama Esquemático Para Tx

II. Nodo Receptor (RX)

El receptor inicia configurando también el NRF24L01 vía SPI, usando el mismo canal 90 y la dirección inversa para recibir exclusivamente desde el transmisor. Se activa el modo escucha (`start_listening()`), esperando paquetes entrantes.

Se utiliza un display OLED controlado por I2C para mostrar los valores recibidos del acelerómetro y el ángulo del servomotor. Para el control físico, se configura un pin PWM para generar la señal que mueve el servomotor.

En el bucle principal, si el NRF24L01 detecta datos entrantes, estos son decodificados desde texto, separando los valores Ax, Ay, Az y el ángulo del servo. El ángulo se aplica directamente al servomotor mediante la función `set_angle()`, y toda la información se muestra en tiempo real en la pantalla OLED.

RX

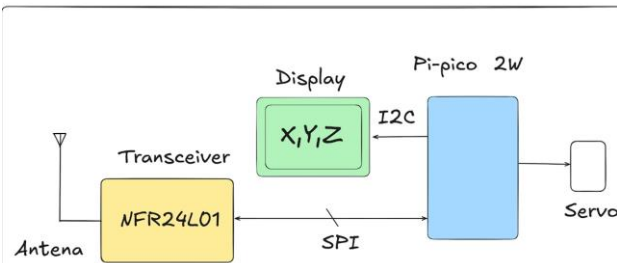


Ilustración. 2. Diagrama Esquemático Para Rx

III. Comunicación Inalámbrica

La comunicación entre los nodos transmisor y receptor se llevó a cabo utilizando los módulos NRF24L01, los cuales operan en la banda ISM de 2.4 GHz, libre de licencia a nivel mundial. Estos módulos se comunican mediante el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) con la Raspberry Pi Pico 2W, lo que permite un intercambio de datos rápido y eficiente.

Para establecer la comunicación punto-punto, se configuraron direcciones únicas para cada nodo, de forma que el transmisor envía únicamente al receptor deseado. Se

seleccionó manualmente un canal específico (canal 90) dentro del rango disponible de 125 canales, buscando evitar interferencia con redes Wi-Fi y otros dispositivos que operan en la misma banda.

El NRF24L01 fue configurado con potencia de transmisión alta (0 dBm) y velocidad de 1 Mbps, priorizando estabilidad sobre velocidad extrema. El receptor permanece en modo de escucha constante (`start_listening()`), esperando paquetes enviados por el transmisor. El tiempo de latencia observado es prácticamente imperceptible (del orden de milisegundos), ideal para aplicaciones de control en tiempo real.

IV. Diagrama funcional del sistema. Diagrama funcional del sistema

En la Ilustración 1 (nodo TX) se observa el esquema de transmisión, donde el joystick entrega señales analógicas al ADC de la Raspberry Pi Pico 2W para generar el ángulo de control del servomotor. De forma simultánea, el acelerómetro MPU6050 se comunica por protocolo I2C con la microcontroladora para obtener datos de aceleración. Finalmente, el módulo NRF24L01 transmite esta información mediante protocolo SPI hacia el nodo receptor.

En la Ilustración 2 (nodo RX) se aprecia el proceso inverso: el módulo NRF24L01 recibe los datos enviados por el transmisor y los reenvía a la Raspberry Pi Pico 2W vía SPI. El ángulo recibido es aplicado a un servomotor utilizando una señal PWM, y adicionalmente los valores X, Y, Z se muestran en una pantalla OLED conectada por I2C, proporcionando retroalimentación visual inmediata.

Estas conexiones garantizan un flujo de datos en tiempo real y una arquitectura modular que permite futuras expansiones como control bidireccional o múltiples receptores.

Pin Pico	Señal SPI	Descripción
6	SCK	Señal de reloj SPI
7	MOSI	Datos del maestro hacia el esclavo
4	MISO	Datos del esclavo hacia el maestro
15	CSN	Selección del chip
14	CE	Habilitación de transmisión/recepción

Tabla. 1. Conexión SPI entre la Raspberry Pi Pico y el módulo NRF24L01

En la configuración del sistema inalámbrico, el módulo NRF24L01 se comunica con la Raspberry Pi Pico mediante el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface), utilizando los pines SCK (6), MOSI (7), MISO (4), CSN (15) y CE (14).

Esta interfaz permite el intercambio de datos de alta velocidad entre el microcontrolador y el módulo de radiofrecuencia, configurado en el canal 98 con un tamaño de paquete de 32 bytes.

Además, los sensores y la pantalla OLED se conectan a través de la interfaz I²C, como se muestra en las Tablas 1 y 2, empleando los pines SDA (10) y SCL (11) junto con las líneas de alimentación VCC (36) y GND (38/23) según el caso.

Pin Pico	Señal	Descripción
10	SDA	Línea de datos I ² C
11	SCL	Línea de reloj I ² C
36	VCC	Alimentación (3.3 V)
23	GND	Tierra

Tabla. 2. Pines dispuestos para la conexión de la Raspberry receptora y la pantalla OLED.

Pin Pico	Señal SPI	Descripción
6	SCK	Señal de reloj SPI
7	MOSI	Datos del maestro hacia el esclavo
4	MISO	Datos del esclavo hacia el maestro
15	CSN	Selección del chip
14	CE	Habilitación de transmisión/recepción

Tabla. 3. Pines dispuestos para la conexión SPI entre la Raspberry Pi Pico y el módulo NRF24L01.

La configuración del sistema integra tres interfaces de comunicación: I²C para el acelerómetro y la pantalla OLED, y

SPI para el módulo NRF24L01.

El bus I²C (pines 10 y 11) se utiliza para intercambiar datos entre la Raspberry Pi Pico y los periféricos de medición y visualización, mientras que el bus SPI (pines 6, 7, 4, 15 y 14) garantiza una comunicación de alta velocidad con el módulo inalámbrico.

El NRF24L01 fue configurado para operar en el canal 76 dentro de la banda ISM de 2.4 GHz, utilizando un tamaño de paquete de 32 bytes, lo que permite un enlace punto a punto confiable con baja latencia. Esta arquitectura de conexión asegura un desempeño estable y sincronizado entre el sistema transmisor y receptor.

V. Análisis Del Espectro Radioeléctrico Y Selección Del Canal

La banda ISM de 2.4–2.5 GHz es una porción del espectro no licenciada ampliamente utilizada por tecnologías como Wi-Fi (IEEE 802.11b/g/n), Bluetooth, dispositivos Zigbee y transceptores como el NRF24L01. Dentro de este rango existen múltiples canales disponibles; en el caso del NRF24L01 el parámetro channel acepta valores enteros de 0 a 125, y la frecuencia de operación suele calcularse como:

$$f_{\text{MHz}} = 2400 + \text{channel}$$

por ejemplo, channel = 98 \rightarrow $f = 2498$ MHz.

El NRF24L01 permite cambiar fácilmente el parámetro channel, por lo que se pueden comparar rápidamente los resultados en otros canales (por ejemplo 20, 50, 90) y elegir el que presente mejor desempeño.

Para la comunicación inalámbrica se utilizó el canal 94 del módulo NRF24L01, seleccionado tras pruebas exploratorias en la banda ISM de 2.4 GHz para minimizar interferencias con redes Wi-Fi cercanas.

Asimismo, se aclara que todos los registros detallados de las pruebas experimentales (tasa de paquetes recibidos, comportamiento del servomotor, latencia real y capturas en tiempo real) se encuentran documentados y disponibles en el repositorio oficial de GitHub del proyecto, garantizando trazabilidad y verificación técnica.

VI. Prueba De Da Señal PWM En El Servo

Las capturas de osciloscopio muestran un pulso activo de aproximadamente 2.20 ms (Ilustración 3), seguido por un periodo total cercano a 20 ms (Ilustración 4), lo que corresponde a una frecuencia efectiva de 50 Hz, consistente con el estándar de control para servomotores RC. Este comportamiento confirma que el sistema genera correctamente el ciclo útil requerido para llevar el servomotor a su posición máxima (180°), validando la correcta configuración del temporizador PWM en la Raspberry Pi Pico 2W. La estabilidad temporal observada indica una generación precisa y libre de

jitter perceptible, adecuada para aplicaciones de control en tiempo real.

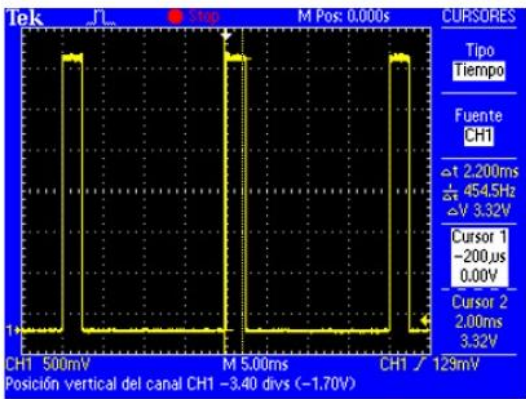


Ilustración. 3. Señal PWM En Osciloscopio Del Ancho Del Pulso Del Servo (180°)

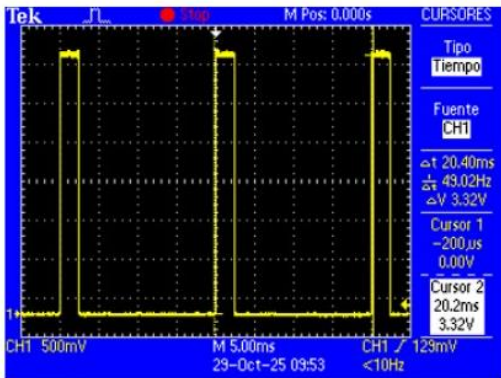


Ilustración. 4. Señal PWM En Osciloscopio Del Periodo Del Servo (180°)

En las capturas se observa un ancho de pulso aproximado de 0.60 ms (Ilustración 5), con un periodo total de 20 ms (Ilustración 6), equivalente a 50 Hz, lo cual coincide con el estándar de servomotores RC. Este ciclo útil reducido representa correctamente la posición mínima (0°) del eje del servomotor.

La estabilidad del periodo y la ausencia de jitter evidente confirman que el generador PWM de la Raspberry Pi Pico 2W opera con precisión temporal adecuada para control angular determinista en tiempo real.

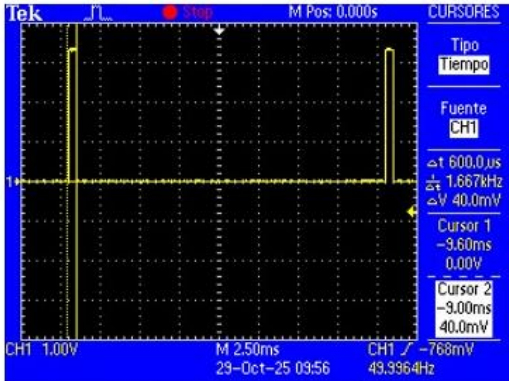


Ilustración. 5. Señal PWM En Osciloscopio Del Ancho Del Pulso Del Servo (0°)

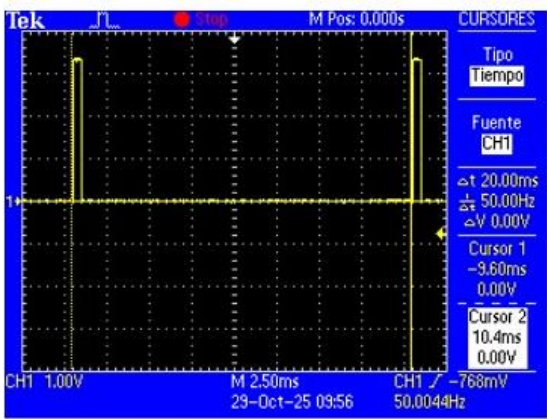


Ilustración. 6. Señal PWM En Osciloscopio Del Periodo Del Servo (0°)

VII. Empleo Del Analizador Logico

A partir de esta configuración, se empleó un analizador lógico para observar la comunicación SPI entre la Raspberry Pi Pico y el módulo NRF24L01.

Se asignaron los canales 0, 1 y 2 del analizador a las líneas MISO, MOSI y SCK, respectivamente. Durante la captura de datos en el software Logic 2, se pudo visualizar claramente el proceso de inicialización y negociación de parámetros entre las antenas transmisora y receptora, evidenciando el intercambio correcto de tramas y la sincronización del protocolo SPI.

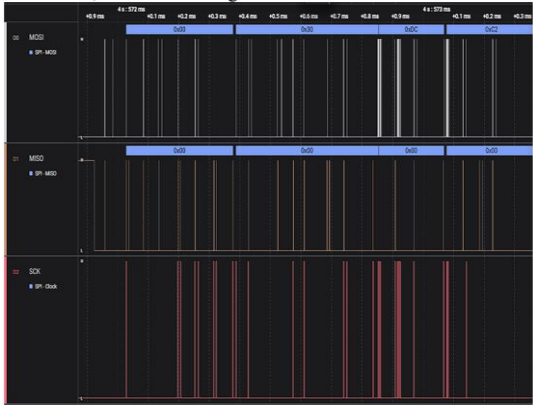


Ilustración. 7. Análisis En El Software Logic2

VIII. Análisis del espectro de transmisión

Por otra parte, es importante resaltar que la frecuencia de transmisión de las antenas NRF24L01 se encuentra dentro de la banda ISM de 2,4 a 2,5 GHz. Para garantizar una comunicación estable y minimizar interferencias, se estableció el canal 98, correspondiente a una frecuencia central aproximada de 2,43 GHz.

Haciendo uso de un analizador de espectros Anritsu MS2724B, se registró la actividad del canal configurado, observándose claramente la presencia de la señal transmitida desde la antena emisora. En la figura se aprecia un pico principal de potencia alrededor de $-86,6$ dBm en 2,498 GHz (Canal 98), correspondiente al canal de transmisión activo.

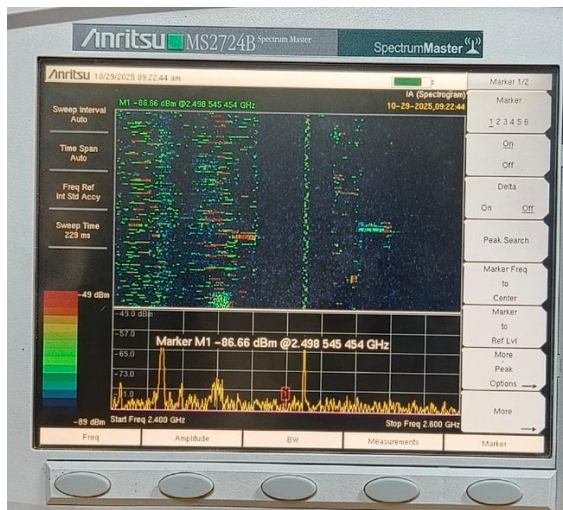


Ilustración. 8. Análisis espectral del canal 98 mediante el analizador de espectros Anritsu MS2724B, mostrando la portadora del sistema NRF24L01 en 2,43 GHz y la coexistencia con señales Wi-Fi y Bluetooth en la banda ISM.

El resto del espectro evidencia la coexistencia de otras señales dentro del mismo rango, atribuibles a redes Wi-Fi en los canales 1 (2,412 GHz), 6 (2,437 GHz) y 11 (2,462 GHz), además de picos menores e intermitentes entre 2,420 GHz y 2,450 GHz, compatibles con dispositivos Bluetooth o IoT. El nivel de ruido de fondo se mantiene dentro de los valores esperados para entornos urbanos con alta densidad electromagnética, originado por fuentes comunes como iluminación LED o equipos electrónicos.

En conjunto, el análisis confirma que la transmisión de datos en 2,43 GHz se realiza correctamente, coexistiendo de manera estable con otras tecnologías de corto alcance dentro del espectro ISM.

Por otra parte, es importante resaltar que la frecuencia de transmisión de las antenas NRF24L01 se encuentra dentro de la banda ISM de 2,4 a 2,5 GHz. Para garantizar una comunicación estable y minimizar interferencias, se estableció el canal 98, correspondiente a una frecuencia central aproximada de 2,43 GHz.

Haciendo uso de un analizador de espectros Anritsu MS2724B, se registró la actividad del canal configurado, observándose claramente la presencia de la señal transmitida desde la antena emisora. En la figura se aprecia un pico principal de potencia alrededor de $-86,6$ dBm en 2,498 GHz, correspondiente al canal de transmisión activo.

El resto del espectro evidencia la coexistencia de otras señales dentro del mismo rango, atribuibles a redes Wi-Fi en

los canales 1 (2,412 GHz), 6 (2,437 GHz) y 11 (2,462 GHz), además de picos menores e intermitentes entre 2,420 GHz y 2,450 GHz, compatibles con dispositivos Bluetooth o IoT. El nivel de ruido de fondo se mantiene dentro de los valores esperados para entornos urbanos con alta densidad electromagnética, originado por fuentes comunes como iluminación LED o equipos electrónicos.

En conjunto, el análisis confirma que la transmisión de datos en 2,43 GHz se realiza correctamente, coexistiendo de manera estable con otras tecnologías de corto alcance dentro del espectro ISM.

CONCLUSIONES

[1] El enlace inalámbrico punto-punto con NRF24L01 operando en el canal 98 mostró baja latencia y alta estabilidad, permitiendo el control exitoso y en tiempo real del servomotor desde el nodo transmisor.

[2] La integración simultánea de SPI, I2C y PWM en la Raspberry Pi Pico 2W demostró una arquitectura eficiente y escalable, adecuada para aplicaciones de control embebido y telemetría inalámbrica.

[3] Las pruebas experimentales fueron documentadas exhaustivamente en el repositorio GitHub, asegurando trazabilidad técnica y facilitando futuras ampliaciones del sistema.

[4] La decodificación verificó la capacidad de recuperar información íntegra incluso en presencia de alteraciones, cumpliendo con los objetivos del laboratorio y resaltando la relevancia de la codificación en entornos de telecomunicaciones.

REFERENCIAS

- [1] MicroPython, machine — functions related to the hardware, Documentación oficial, [En línea]. Disponible en: <https://docs.micropython.org/en/latest/library/machine.html>. [Accedido: 14-ago-2025].
- [2] Raspberry Pi Foundation, Getting started with MicroPython on Raspberry Pi Pico, Documentación oficial, [En línea]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/micropython.html>. [Accedido: 14-ago-2025].
- [3] W. Stallings, Data and Computer Communications, 10th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2014.
- [4] ANSI/TIA, TIA-232-F: Interface Between Data Terminal Equipment and Data Circuit-Terminating Equipment Employing Serial Binary Data Interchange, Telecommunications Industry Association, 1997.
- [5] A. S. Tanenbaum and D. Wetherall, Computer Networks, 5th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2011.

[6] Vasquez Rojas, D. (s.f.). *dylanrojas04 - Overview*. GitHub. <https://github.com/dylanrojas04>

[7] NXP Semiconductors, I²C-bus specification and user manual, Rev. 7.0, April 2014.

[8] J. Rugeles, Repositorio de prácticas de comunicación digital – I²C con Raspberry Pi Pico, Universidad Militar Nueva Granada. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/jrugeles/I2C>