

Esp-now vs. wifi: an analysis of temporal determinism in high-frequency industrial telemetry.

Matias Nicolas Montiel Torres [\[0009-0005-9572-7839\]](#)

, Balich Néstor Adrián [\[0009-0002-3868-1967\]](#), Franco Adrián Balich [\[0009-0008-6434-7827\]](#)

Laboratorio de robótica física e inteligencia artificial (LRFIA)
Centro de Altos Estudios en Tecnología Informática (CAETI)
Universidad Abierta Interamericana. Informática (UAI)
Montes de Oca 745. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

`MatiasNicolas.MontielTorres@alumnos.uai.edu.ar`
`{nestor.balich, francoadrian.balich}@uai.edu.ar`

Abstract. In Industrial Internet of Things (IIoT) applications, communication determinism and low latency are critical for closed-loop control and real-time monitoring. While WiFi is widely adopted for wireless connectivity, its protocol overhead and reliance on centralized infrastructure often introduce non-deterministic delays. This paper presents an experimental comparison between ESP-NOW, a connectionless low-power protocol, and traditional WiFi (UDP-based) using ESP32 edge devices. Latency, jitter (measured as standard deviation), and packet loss are evaluated under different transmission frequencies (10 Hz, 50 Hz, and 100 Hz) using a round-trip time (RTT) methodology. Results show that ESP-NOW achieves significantly lower latency (~2.4 ms) and up to two orders of magnitude reduction in jitter compared to WiFi, demonstrating its suitability for high-frequency industrial telemetry scenarios where temporal determinism is critical.

Keywords: IIoT, ESP-NOW, WiFi, Low Latency, ESP32, Real-Time Systems.

Esp-now vs. wifi: un análisis del determinismo temporal en telemetría industrial de alta frecuencia.

Resumen. En aplicaciones de Internet de las Cosas Industrial (IIoT), el determinismo en la comunicación y la baja latencia son fundamentales para el control de lazo cerrado y el monitoreo en tiempo real. Si bien WiFi es ampliamente utilizado como tecnología de conectividad inalámbrica, la sobrecarga de su protocolo y su dependencia de infraestructura centralizada suelen introducir retardos no deterministas. En este trabajo se presenta una comparación experimental entre ESP-NOW, un protocolo sin conexión de bajo consumo, y WiFi tradicional basado en UDP, utilizando dispositivos ESP32 en el borde. Se evalúan la latencia, el jitter (medido como desviación estándar) y la

pérdida de paquetes bajo diferentes frecuencias de transmisión (10 Hz, 50 Hz y 100 Hz), empleando una metodología de tiempo de ida y vuelta (RTT). Los resultados muestran que ESP-NOW alcanza una latencia significativamente menor (~2,4 ms) y una reducción de hasta dos órdenes de magnitud en el jitter en comparación con WiFi, demostrando su idoneidad para escenarios de telemetría industrial de alta frecuencia donde el determinismo temporal es crítico.

Palabras clave: IoT, ESP-NOW, WiFi, Baja Latencia, ESP32, Sistemas de Tiempo Real.

1 Introducción

La digitalización de la industria ha incrementado la demanda de redes inalámbricas capaces de soportar comunicación crítica en aplicaciones de Internet de las Cosas Industrial (IIoT). En este contexto, los dispositivos basados en ESP32 han ganado relevancia por su bajo costo y capacidad de procesamiento en el borde, reduciendo la latencia y la dependencia de infraestructura centralizada (Qiu et al., 2025).

Sin embargo, protocolos tradicionales como WiFi, basados en IEEE 802.11, presentan limitaciones en términos de determinismo temporal debido a mecanismos como CSMA/CA y la dependencia de puntos de acceso, lo que introduce variabilidad en la latencia (jitter) (IEEE, 2021).

ESP-NOW surge como una alternativa a nivel de capa de enlace que permite comunicación directa sin asociación previa ni infraestructura centralizada, reduciendo el overhead protocolar (Espressif Systems, 2023).

No obstante, existe limitada evidencia experimental sobre su desempeño en términos de determinismo temporal en escenarios de telemetría de alta frecuencia, particularmente frente a WiFi basado en UDP (Eridani et al., 2021).

Este trabajo presenta una evaluación experimental comparativa entre ambos protocolos en dispositivos ESP32, analizando latencia, jitter y pérdida de paquetes a diferentes frecuencias de transmisión, con el objetivo de determinar su idoneidad para aplicaciones industriales en tiempo real. Se enmarca en una línea de investigación orientada al análisis del determinismo temporal en protocolos de comunicación inalámbrica para sistemas IIoT de tiempo real, con foco en dispositivos de bajo costo.

2 Metodología Experimental

Se diseñó un banco de pruebas compuesto por dos microcontroladores operando a 240 MHz.

2.1 Especificaciones de Hardware

- **Nodos de Cómputo:** Dos módulos ESP32-WROOM-32D (240 MHz).
- **Configuración Física:** Los nodos se posicionaron a una distancia fija de 2 metros, manteniendo una línea de visión directa (LOS - Line) sin obstáculos.
- **Infraestructura WiFi:** Access Point en 2.4 GHz (canal 6). Ambos protocolos operaron en el mismo canal para garantizar comparabilidad.

2.2 Escenarios de Comunicación

Se evaluaron dos escenarios:

- **Escenario 1 (ESP-NOW):** Comunicación directa peer-to-peer, mediante direcciones MAC, operando en la capa de enlace.
- **Escenario 2 (WiFi UDP):** Comunicación mediante AP utilizando sockets UDP.

2.3 Diseño del Experimento y Procesamiento de Datos

Se desarrolló una aplicación de "echo" (Round-Trip) donde el Nodo A envía un paquete de 32 bytes con un identificador de secuencia y un timestamp capturado mediante `esp_timer_get_time()` (precisión de microsegundos). El Nodo B, al recibir la trama, la reenvía inmediatamente al emisor.

Captura y análisis de datos:

Las mediciones fueron registradas mediante un script en Python que captura los datos desde el puerto serie y los almacena en archivos CSV, permitiendo la recolección de 500 muestras por frecuencia (10, 50 y 100 Hz).

El procesamiento se realizó en Python utilizando pandas y matplotlib, incluyendo la conversión de microsegundos a milisegundos y el cálculo de métricas de tendencia central. Para evaluar el determinismo temporal, se utilizó la desviación estándar como métrica de jitter (Liu et al., 2025), definida como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

donde σ representa el jitter, x_i cada medición de latencia, μ la latencia promedio y N el número total de muestras. Este enfoque asume simetría en los tiempos de transmisión entre nodos con hardware y configuración idénticos.

3 Resultados y Discusión

Los resultados preliminares indican diferencias significativas en el desempeño temporal de ambos protocolos, especialmente bajo condiciones de alta frecuencia de muestreo. En términos relativos, WiFi presenta latencias aproximadamente 40 veces mayores y valores de jitter hasta 60 veces superiores respecto a ESP-NOW en el escenario de 100 Hz.

3.1 Análisis de Latencia y Jitter

La Tabla 1 detalla el desempeño medido. La latencia fue estimada a partir del tiempo de ida y vuelta (Round-Trip Time, RTT), considerando la mitad del tiempo total medido $L = RTT/2$. Los resultados obtenidos evidencian una diferencia significativa en el

comportamiento temporal de ambos protocolos, particularmente a medida que aumenta la frecuencia de transmisión.

Table 1. Comparativa de Latencia y Jitter.

Frecuencia	Protocolo	Latencia Promedio (ms)	Jitter (σ) (ms)	Perdida (%)
10 Hz	ESP-NOW	2.35	1.14	0
10 Hz	WiFi (UDP)	113.21	56.27	2.6
50 Hz	ESP-NOW	2.57	1.5	0
50 Hz	WiFi (UDP)	107.49	54.77	1.4
100 Hz	ESP-NOW	2.41	1.51	0
100 Hz	WiFi (UDP)	105.29	93.41	2.8

3.2 Visualización de Resultados

Los resultados se representaron mediante gráficos de series temporales y diagramas comparativos, permitiendo analizar la estabilidad de la latencia y la variabilidad (jitter) entre ambos protocolos Figura 1.

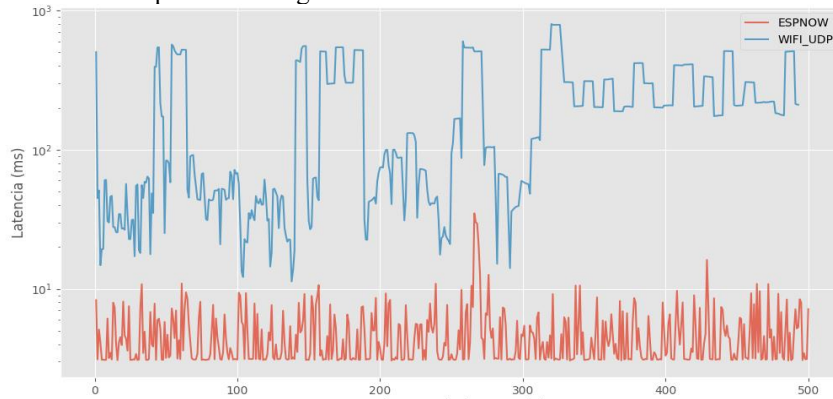


Fig 1. Comparación de la estabilidad temporal (RTT) entre ESP-NOW y WiFi a 100 Hz.

3.3 Discusión

La latencia observada en WiFi (~110 ms) es consistente con implementaciones basadas en pilas estándar, como sistemas de control remoto mediante MQTT con tiempos de respuesta cercanos a 100 ms (Balich et al., 2025a). Este comportamiento se atribuye a la sobrecarga de la pila TCP/IP y a los mecanismos de acceso al medio compartido, lo que introduce variabilidad temporal.

En contraste, los resultados preliminares indican que ESP-NOW reduce la latencia a valores cercanos a 2.4 ms, al operar sin las capas superiores de comunicación. Esta diferencia sugiere una mejora significativa en el determinismo temporal, aspecto crítico en aplicaciones de telemetría industrial de alta frecuencia (Eridani et al., 2021).

4 Conclusiones y Trabajo Futuro

Este trabajo presentó una evaluación experimental comparativa entre ESP-NOW y WiFi (UDP) en dispositivos ESP32, enfocada en métricas de desempeño temporal. Este trabajo confirmó que ESP-NOW permite una latencia inferior a los 2 ms, con un determinismo superior al WiFi convencional. Los resultados obtenidos demuestran que ESP-NOW ofrece menor latencia y variabilidad (jitter), lo que lo convierte en una alternativa más adecuada para aplicaciones de telemetría industrial de alta frecuencia y sistemas de control en tiempo real. Su naturaleza sin conexión no solo mejora la latencia, sino que también ofrece un consumo de energía reducido, factor clave para la sostenibilidad de nodos en entornos industriales hostiles (Eridani et al., 2021). Estas características permiten mejorar la flexibilidad y competitividad empresarial en el marco de la Industria 4.0 (Qiu, F., Kumar, 2025).

Como trabajo futuro, se evaluará el impacto del cifrado sobre la latencia, dado que la limitada capacidad computacional de los nodos IoT suele restringir el uso de algoritmos de seguridad convencionales (Sharma & Bhushan, 2026). Siguiendo los principios de arquitectura por capas (Kumar & Mallick, 2018), es imperativo investigar protocolos ligeros que mantengan el determinismo temporal frente a la marcada heterogeneidad del ecosistema. Adicionalmente, se analizará la integración de ESP-NOW en arquitecturas de procesamiento en el borde para garantizar respuestas inmediatas inferiores a 30 ms (Subashree et al., 2026). Este rendimiento es fundamental para habilitar interfaces de interacción natural y accesible en robótica inclusiva, donde el control en tiempo real mediante sensores de movimiento permite una teleoperación intuitiva y ergonómica (Balich et al., 2025b). Finalmente, se estudiará la escalabilidad en entornos de alta densidad para asegurar la confiabilidad operativa en la Industria 4.0 (Qiu et al., 2025).

Referencias bibliográficas

- Qiu, F., Kumar, A., Hu, J., Sharma, P., Tang, Y. B., Xu Xiang, Y. y Hong, J. (2025). A Review on Integrating IoT, IIoT, and Industry 4.0: A Pathway to Smart Manufacturing and Digital Transformation. *IET Information Security*, 2025, 9275962. <https://doi.org/10.1049/ise2/9275962>.
- Eridani, D., Rochim, A. F. y Cesara, F. N. (2021). Comparative Performance Study of ESP-NOW, Wi-Fi, Bluetooth Protocols based on Range, Transmission Speed, Latency, Energy Usage and Barrier Resistance. *2021 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, 322-328. <https://doi.org/10.1109/iSemantic52711.2021.9573246>.
- Espressif Systems. (2023). ESP-NOW Technical Reference Manual. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp-now_user_guide_en.pdf.
- Urazayev, Dnislam & Eduard, Aida & Ahsan, Muhammad & Zorbas, Dimitrios. (2023). Indoor Performance Evaluation of ESP-NOW. [10.1109/SIST58284.2023.10223585](https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223585).
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2021). IEEE standard for information technology--telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks--specific requirements part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 1: Enhancements for high-efficiency WLAN (IEEE Std 802.11ax-2021). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9442429>.

- Sharma, A., & Bhushan, K. (2026) . A comprehensive survey on IoT security: Challenges, security issues, and countermeasures. *Computer Science Review* , 59 , Artículo 100839 . <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2025.100839>.
- Subashree, S., Rajakumaran, M., Pushpa, G., & Manivannan, R. (2026). Adaptive machine learning models for predictive maintenance in industrial internet of things (IIoT) systems. *Scientific Reports*, 16, Artículo 12451. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-42666-x>.
- Balich, N. A., Balich, F. A., Bolivar, M., Rossi, M. F., Montiel, M., y Galizio, R. (2025a). Implementación de MQTT y App inventor para el control remoto de robots en entornos de aprendizaje interactivo. En *Libro de Actas - XXVII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación WICC 2025* (pp. 418-422). Red de Universidades con Carreras en Informática. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/184035>.
- Balich, N. A., Balich, F. A., Bolivar, M., Rossi, M. F., Montiel, M., y Galizio, R. (2025b). Control adaptado para la interacción natural y accesible: robótica inclusiva. En *Libro de Actas - XXVII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación WICC 2025* (pp. 398-402). Red de Universidades con Carreras en Informática. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/183537>.
- Liu, Z., Li, K., Wang, Y., & Zhu, P. (2025). Mixed traffic scheduling with latency and jitter analysis in URLLC industrial automation. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(12), 18820-18835. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3566083>.