FACULTAD 50 AÑOS DE INGENIERÍA UNaM
JIDeTEV 2025
XV Jornadas de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Extensión, Vinculación y Muestra de la Producción

Monitoreo de las vibraciones en accionamientos eléctricos utilizando una red de sensores inalámbricos

Ivo F. M. Lory[a] *, Manuel A. Mazzoletti[a],
Oriana M. Simonovets[a], Ángel G. Garcilazo[a]
[a] *LIDEE−Facultad de Ingeniería, UNaM*
e-mails: ivoflory@gmail.com, amazzoletti@fio.unam.edu.ar
simonovetsoriana@gmail.com, garcilazofio@gmail.com,

Resumen

En este trabajo se presenta la implementación de una red de sensores inalámbricos (conocida por sus siglas como WSN, Wireless Sensor Network) para la medición y registro de señales de vibraciones en motores industriales. La comunicación entre nodos se realiza a través de un protocolo de comunicación basado en el estándar IEEE802.11 y disponible en el microcontrolador de propósitos generales utilizado. Actualmente, la WSN se compone de tres nodos, dos de ellos miden, registran y transmiten datos de vibraciones al nodo receptor. El nodo receptor se encarga de recolectar y almacenar los datos provenientes de motores industriales de diferentes características. A partir de los registros de datos se realiza el procesamiento de señales para calcular el espectro de frecuencia de la velocidad mecánica en mm/s. Se presentan los resultados de mediciones experimentales y se determina el estado de salud de los motores considerando la norma ISO 20816.

Palabras Claves Motores eléctricos, Vibraciones, Procesamiento de señales, Redes de sensores.

1 Introducción

La cuarta revolución industrial o Industria 4.0 [1], la automatización y el intercambio de datos en tiempo real entre dispositivos juegan un papel crucial en el control y supervisión de los sistemas. Las redes de comunicación inalámbricas se han convertido en herramientas fundamentales para lograr estos objetivos, permitiendo una conexión efectiva entre los dispositivos ubicados en entornos industriales de difícil acceso o distantes de los centros de supervisión. Con la creciente adopción del Internet de las Cosas (IoT), las máquinas eléctricas rotativas (MER) y los accionamientos eléctricos (AE) en general pueden ser monitoreados y controlados a distancia, optimizando la eficiencia operativa y reduciendo tiempos de inactividad. En este contexto, las redes de sensores inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Networks*) se destacan como una de las tecnologías más aplicadas debido a su capacidad de transmitir datos desde múltiples sensores distribuidos en una planta o unidad de proceso.

Las aplicaciones de IoT en la industria son variadas, desde el monitoreo de condiciones de suelo en agricultura, la supervisión de consumo energético hasta el estado de operación en línea de maquinarias industriales [2] [3] [4]. Estas soluciones abarcan una diversidad de protocolos de comunicación, tales como Wi-Fi, Bluetooth, MQTT, Zigbee o ESP-NOW, cada uno adaptado a necesidades específicas de conectividad y consumo energético [5] [6]. Pruebas piloto se han desarrollado a nivel local para monitorear las vibraciones de aerogeneradores [7]. Sin embargo, las soluciones de monitoreo basadas en IoT son incipientes en la región y la mayoría de los productos son desarrollados por empresas reconocidas a nivel mundial, con protocolos propietarios y elevados costos.

Para evaluar las vibración de maquinarias se recurre a la la norma internacional ISO 20816 [8] Esta normativa define pautas generales para la medición y evaluación de la vibración mecánica. Establece los puntos en los que deben realizarse las mediciones, las magnitudes relativas y absolutas que son apropiadas para cada caso, junto a los criterios de aceptación para las mediciones. También define el término severidad, que es el valor máximo de la magnitud de banda ancha medido bajo condiciones operativas acordadas. En base a la severidad, define zonas en las cuales se puede clasificar el estado de un motor según la magnitud de las vibraciones. Por último, menciona otros métodos de evaluación diferentes a la medición de banda ancha, como puede ser la medición de los valores máximos, la comparación entre el pico y el valor rms de la aceleración o el análisis de componentes de frecuencias.

Este trabajo presenta el diseño y la implementación de una WSN con el fin de supervisar el estado de funcionamiento de AE a través de la medición de vibraciones en tiempo real. El objetivo es verificar la correcta medición, registro y trasmisión de datos y comparar las magnitudes absolutas de vibraciones que aparecen en el espectro de la velocidad mecánica con los límites recomendados por la norma. En [9] se presentaron los objetivos de la propuesta y los primeros avances en relación a la selección de sensores, protocolos de comunicación y resultados experimentales incipientes. En este trabajo se describe el diseño de la unidad de sensado remoto, el desarrollo del firware para el procesamiento de señales del nodo sonsor y receptor, la normativa que se aplican para la evaluación de las vibraciones mecánicas de las MER. Además se presentan resultados experimentales obtenidos en el laboratorio utilizando MER de potencias distintas y tiempos de registros diferentes. A partir de las señales adquiridas se obtienen los espectros en frecuencia de la velocidad de vibraciones en mm/s para identificar frecuencias características y comparan sus amplitudes con los niveles de referencias especificados en la norma.

2 Red de sensores inalámbrica, WSN

El sistema propuesto consta de tres nodos de comunicación, dos de ellos colocados sobre la carcasa de dos MER que se requiere supervisar, instrumentado con el sensor para la medición y un dispositivo para el registro y la transmisión de señales. El tercer nodo se encuentra ubicado en una central de monitoreo, quien recibe los datos transmitidos en instantes de tiempos configurables y procesa los datos para su evaluación. En la Fig.1 se muestra el esquema del sistema de comunicación propuesto.

2.1 Construcción del módulo sensor

En el diseño del módulo sensor se priorizaron ciertas características como su movilidad, tamaño y la operación en modo inalámbrico, entre otras. En esta primera instancia del desarrollo se seleccionó un microcontrolador ESP-32 de la marca Espressif , específicamente, el modelo TTGO ESP32 Dev

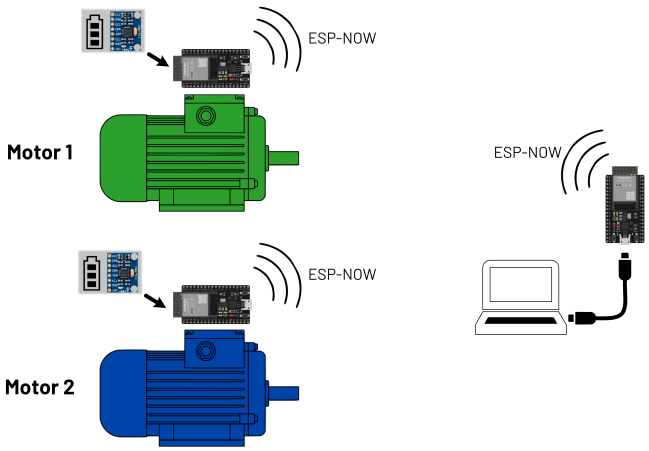


Fig. 1: Esquema del sistema de comunicación propuesto.

module. La selección de este dispositivo se atribuye a dos motivos principales: la posibilidad de ser programado en MicroPython, un lenguaje de alto nivel, y la utilización del protocolo propietario de este dispositivo, denominado ESP-NOW [10]. Además, este modelo tiene integrado un soporte para batería de Ion-Litio que garantiza su autonomía y, a su vez, puede ser operado con una fuente de alimentación externa. Proporciona una pantalla OLED de 0,96” integrada al microcontrolador, lo cual permite visualizar los estados de inicio, envío de datos y finalización de la comunicación.

Las mediciones de las señales de vibraciones se realizaron mediante el sensor MPU6050 incluido en el nodo sensor. Este sensor mide los desplazamientos y giros espaciales en los ejes coordenados x, y, z. La tasa de muestreo del acelerómetro es fija de 0,5 kS. A partir de las mediciones de la aceleración registradas se calcula la velocidad en tres ejes. En la base del módulo se incrustaron imanes de alta densidad de flujo para facilitar su fijación en la superficie metálica de la carcasa del motor, permitiendo realizar una serie de mediciones consecutivas y variar la posición del nodo sensor. Todos los componentes fueron ensamblados dentro de una estructura de material PLA realizada en impresión 3D, la cual permite visualizar la pantalla OLED, acceder a los botones de inicio-encendido y al compartimiento de la batería. La unidad de sensado es ensamblada por piezas hechas a medida, como se muestra en la Fig. 2.

2.2 Protocolo para la comunicación

Para la comunicación inalámbrica entre nodos distribuidos se utilizó el protocolo ESP-NOW compatible con sus microcontroladores ESP-32 y ESP-8266. Si bien el protocolo está basado en el estándar IEEE802.11 1999 [11], su principal ventaja frente a otros protocolos se basa en la interconexión de sistemas abiertos mediante el uso de una simple capa, ahorrando tiempos de conexiones al momento de solicitar autorizaciones y establecer la comunicación. Permite la comunicación unicast encriptada y sin encriptación, con la posibilidad de transmitir de forma *peer to peer* o *broadcast*. Cuenta con la posibilidad de enviar hasta 250 bytes de datos por mensaje y de configurar *callbacks* para informar a la aplicación si la transmisión ha sido correcta. Comparado con el Wi-Fi estándar, el ESP-NOW es al menos 10 veces más rápido, y dado que los nodos de sensado son portátiles y alimentados por baterías, se priorizó el ahorro de energía, lo que se logra de manera eficiente con ESP-NOW [12]. Presenta buen desempeño para comunicaciones de media distancia, llegando a superar los 60 metros en espacios abiertos [13].

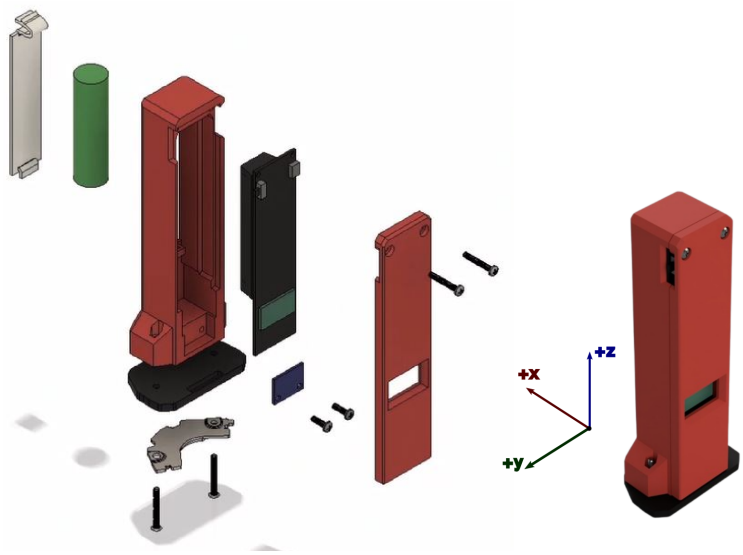


Fig. 2: Modelo de la unidad de sensado remoto.

3 Implementación de la WSN

3.1 Desarrollo del firmware

El inicio del muestreo comienza cuando se presiona el botón de BOOT. Los valores de aceleración del sensor son adquiridos cada 2 ms. Por cada medición se registran un número de muestras configurables, las cuales corresponden a la aceleración en los tres ejes y al identificador de la medición (AcX, AcY, AcZ, id). Como el protocolo ESP-NOW soporta mensajes de hasta 250 bytes, el nodo transmisor toma los valores sensados de la medición y los agrupa en arreglos de números enteros de 25 filas por 4 columnas para almacenarlos en una lista, para utilizar adecuadamente la trama de cada mensaje enviado por el protocolo ESP-NOW [11] [14]. Una vez formados todos los paquetes individuales, se inicia la configuración del protocolo de comunicación, que consiste en iniciar la interfaz WLAN y añadir al dispositivo receptor mediante su dirección MAC. Una vez configurado, se procede a enviar los datos con intervalos de espera de 100 milisegundos, tiempo establecido para que el receptor tenga tiempo suficiente de procesar los datos recibidos. El tiempo que toma la adquisición de señal y el tiempo de la transmisión de datos dependen directamente de la cantidad de muestras que se registran en cada medición. Así, se tiene que por ejemplo para 5000 muestras el tiempo de adquisición es de 10 s y el de transmisión de 60s, mientras que para 10000 muestras estos tiempos se duplican.

En el otro extremo, el nodo receptor inicia su rutina abriendo un archivo de texto vacío y se dispone en “estado de espera” de datos. El receptor recibe un nuevo dato y lo añade al final de la pila en el archivo de texto abierto. El tiempo de recepción y procesamiento de los datos es variable. Como este nodo debe guardar los datos que se reciben del transmisor, se espera que el tiempo total del programa sea mayor que el del transmisor. De todas formas, el dispositivo está configurado para almacenar en su búfer de recepción todas las muestras recibidas, por lo que no se corre el riesgo de perder paquetes por un desbordamiento de búfer. En la Fig. 3 se muestra el diagrama de flujo de las rutinas codificadas en ambos nodos: sensor y receptor. Una vez se han recibido los datos, el nodo receptor implementa el algoritmo de procesamiento de señales. El mismo consiste en convertir los datos transmitidos a unidades del SI, aplicar un filtro antialiasing, eliminar el valor medio de la señal, calcular la velocidad de vibración, realizar la FFT para cada ventana de medición, entre otras rutinas.

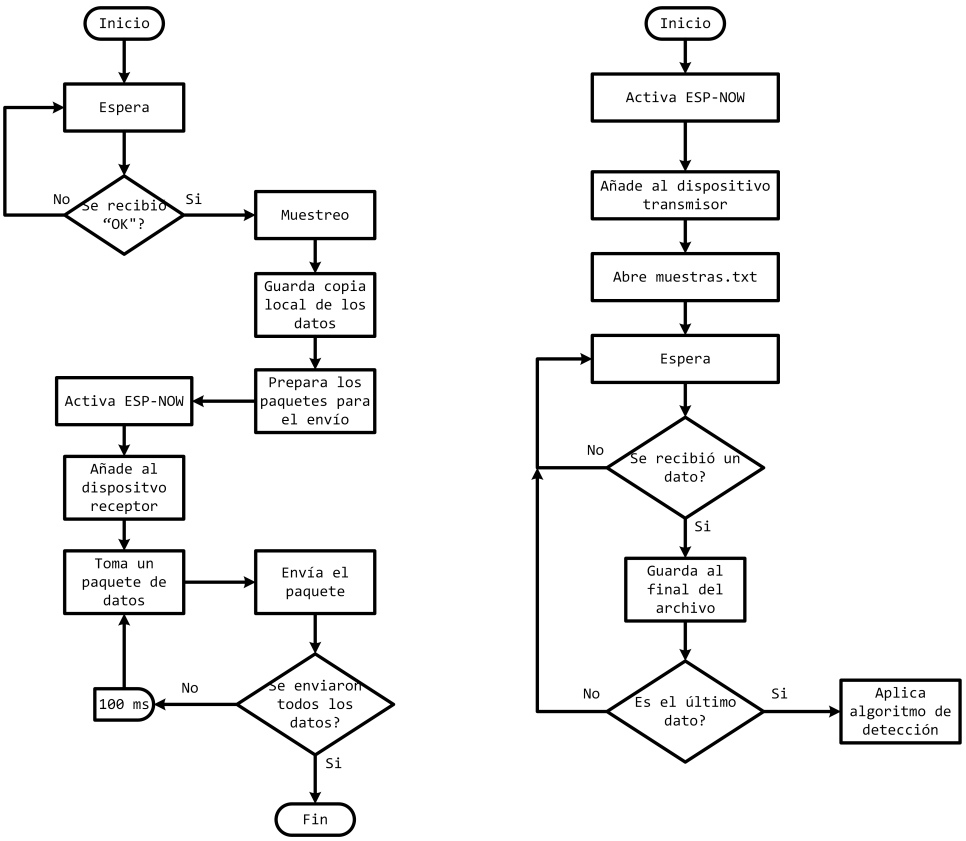


Fig. 3: Diagrama de flujo del procesamiento de datos: Nodo sensor (izquierda), nodo receptor (derecha).

4 Evaluación de las vibraciones mecánicas

A partir de la norma ISO 20816:2016 [8], en la Fig. 4 se presenta una imagen donde se indican los niveles según la frecuencia analizada en el espectro. Estos rangos proporcionan los criterios de evaluación de la velocidad de vibración. La caracterización de las zonas A, B, C y D se define según el tipo de máquina y potencia. Las cuatro zonas de evaluación se definen según los siguientes criterios:

- **Zona A**: vibración típica de máquinas recién puestas en marcha.
- **Zona B**: aceptable para operación a largo plazo sin restricciones.
- **Zona C**: considerada insatisfactoria para operación continua a largo plazo; se pueden necesitar medidas correctivas y la operación puede ser por tiempo limitado.
- **Zona D**: valores de vibración de suficiente gravedad como para causar daños en la máquina.

El eje de abscisas representa las frecuencias características y el eje de ordenadas las amplitudes de las componentes en rms. En la mayoría de los casos, la velocidad de la vibración es suficiente para caracterizar estados de falla en un amplio rango de velocidades de operación. Sin embargo, la vibración asociada a un determinado rango de frecuencias depende del tamaño y la masa del cuerpo vibratorio, de las características del sistema de montaje y de la producción y el uso de la máquina. Se puede implementar una campana que contemple un rango de frecuencias para evaluar su severidad. Normalmente, esta se centra en la componente fundamental o 1X del motor, y se dejan unas bandas laterales que decrecen a medida que se alejan de esta componente.

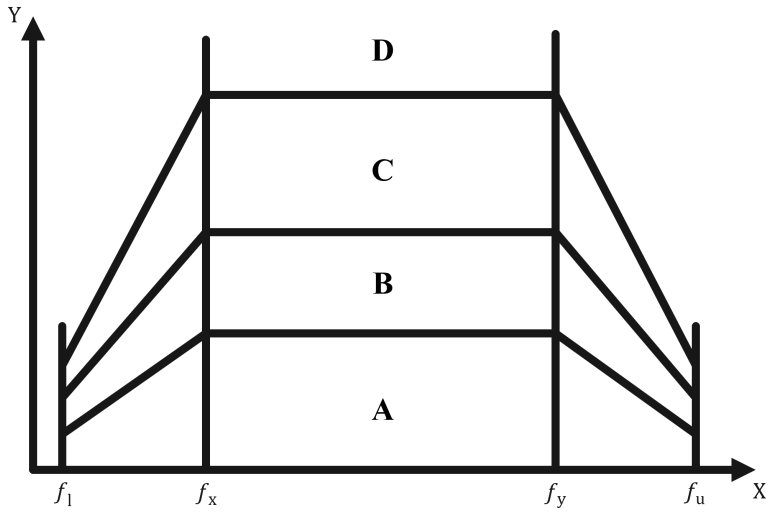


Fig. 4: Rango de valores admisibles según la norma ISO 20816.

4.1 Definición de rangos de tolerancias

En la Fig. 5 se muestra los rangos de tolerancias de velocidades en in/s y mm/s para distintos tipos de máquinas y potencias. Para las máquinas eléctricas analizadas en este trabajo (es decir, de potencia menor a 15 kW sobre una base rígida), se define el rango de 0 a 1,4 mm/s para máquinas recientes puestas en servicio (zona A), de 1,4 a 2,8 mm/s para máquinas que pueden operar sin restricciones (zona B), de 2,8 a 4,5 mm/s como una zona en la que la máquina solamente debe utilizarse por periodos de tiempo limitados (zona C) y por encima de 4,5 mm/s la máquina está expuesta a niveles de vibración dañinos para la misma y debe detenerse su funcionamiento (zona D) [15].

En la Fig. 6 se muestra un ejemplo donde se comparan las amplitudes espectrales de la velocidad de vibraciones con los niveles especificados en la norma.

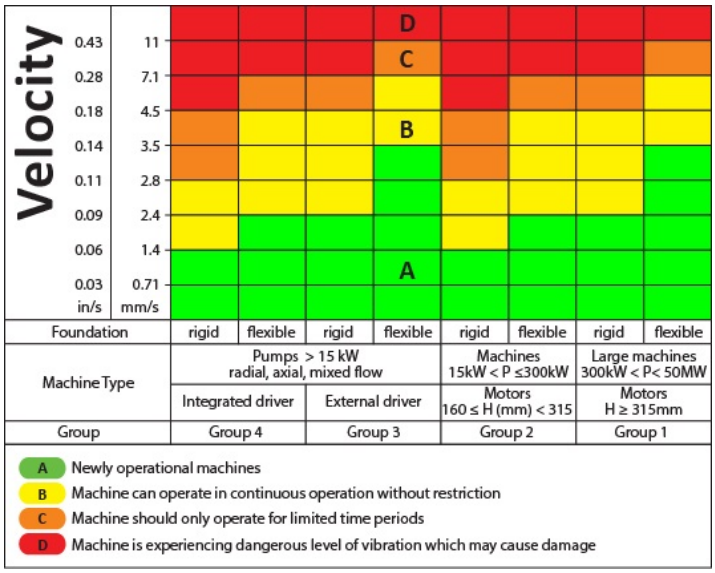
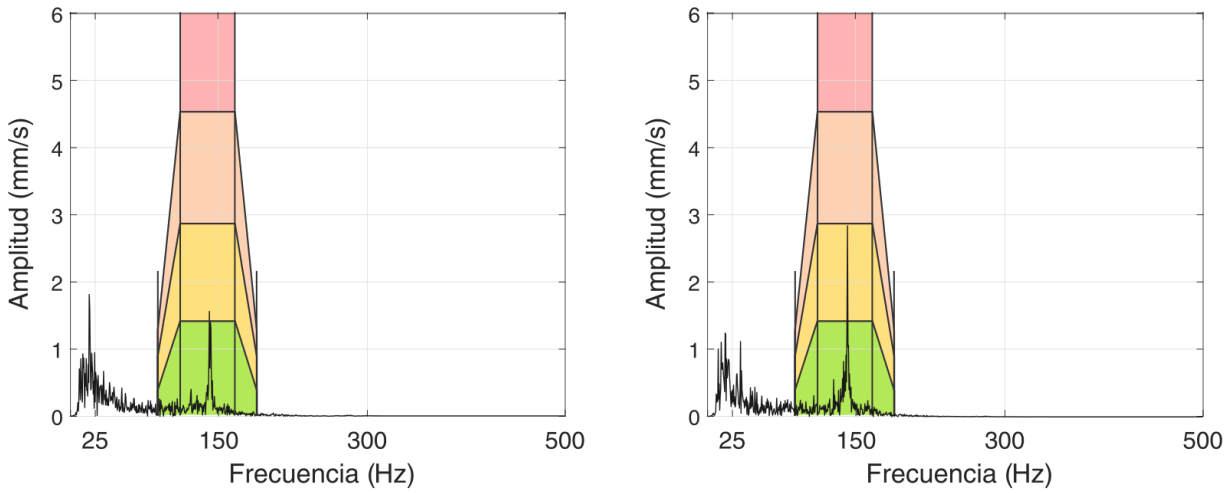


Fig. 5: Rangos de valores de velocidad admisibles para distintos tipos de máquinas [8]



(a) Motor normal

(b) Motor con falla

Fig. 6: Superposición del espectro de velocidad con los niveles de tolerancias para un motor en funcionamiento normal y ante perturbaciones mecánicas.

4.2 Resultados experimentales

Los registros de vibraciones fueron realizados a una frecuencia de muestreo de 0,5 kS sobre dos motores de inducción, el Motor Nº 1 de 0,5 hp con 6 polos y el segundo Motor Nº 2 de 2 hp con 4 polos. Las mediciones se realizaron con el sensor ubicado en posición vertical sobre la tapa trasera de ambos motores para el estado de vacío, registrando entre $2x10^3$, $5x10^3$ y $10x10^3$ muestras de señal.

En la Fig. 7 se presenta los resultados experimentales obtenidos sobre un motor de inducción de 6 polos montado sobre una fundación rígida. Se muestran los espectros de frecuencias de la velocidad en los tres ejes coordenados: x, y, z. Puede observarse principalmente la componente correspondiente a la frecuencia de rotación del eje del motor en 16,66 Hz y denominada 1X. Para comparar las amplitudes de las componentes espectrales se determina los niveles correspondientes a máquinas de potencias menores a 15 kW mostrados en la Fig. 5.

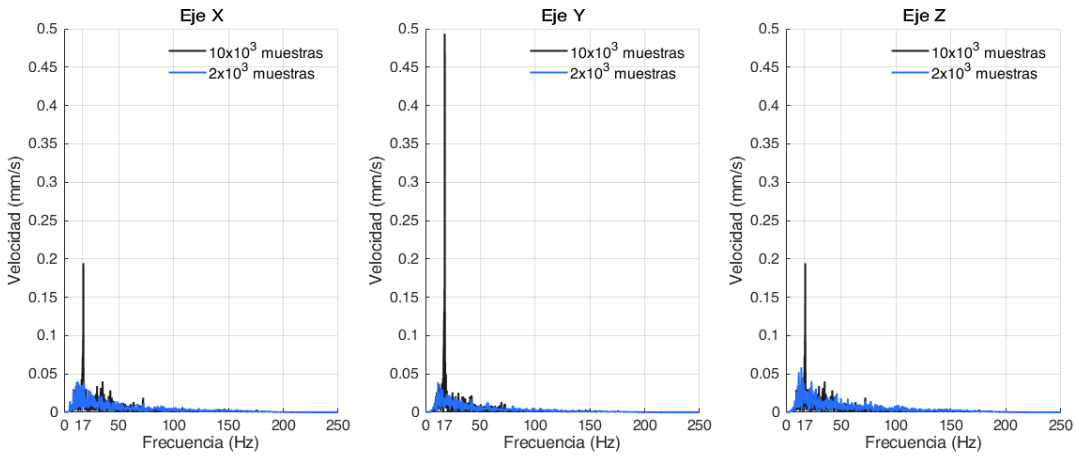


Fig. 7: Espectro de frecuencia de la velocidad para un Motor Nº 1 de 6 polos para distintos tiempos de registros.

Se observa que para menor cantidad de muestras ($2x10^3$) no se logra identificar la componente 1X debido a la baja resolución en frecuencia, mientras que incrementando el número de muestras ($10x10^3$) puede observarse con claridad esta frecuencia característica en los tres ejes coordenados. En cuanto a las amplitudes espectrales, se obtienen máximos de 0,19 mm/s para los ejes x, z, y 0,49 mm/s para el eje y, por lo que puede inferirse que estas magnitudes se encuentra en el rango de la zona A, correspondiente a un motor puesto en funcionamiento recientemente.

En la Fig. 8 se presentan los resultados obtenidos sobre un motor de 4 polos. Aquí también se comprueba que para $2x10^3$ muestras, los espectros de velocidad presentan baja resolución. Sobre el eje y, al aumentar la cantidad de muestras a $5x10^3$ se vuelve observable la frecuencia de rotación del rotor 1X en 25 Hz, alcanzando un valor cercano a 0,2 mm/s. Para los espectros de los ejes x, z, se presentan otras componentes múltiplos como la 2X, 3X y 4X. Las componentes en 2X y 3X se corresponden con frecuencias de vibración natural del rotor. Por otro lado, la componente 4X se presenta como consecuencia de los efectos introducidos debido a los problemas de calidad de energía como el desequilibrio de tensiones o las asimetrías del rotor como las excentricidades, desalineaciones, imperfecciones rotoricas entre otras.

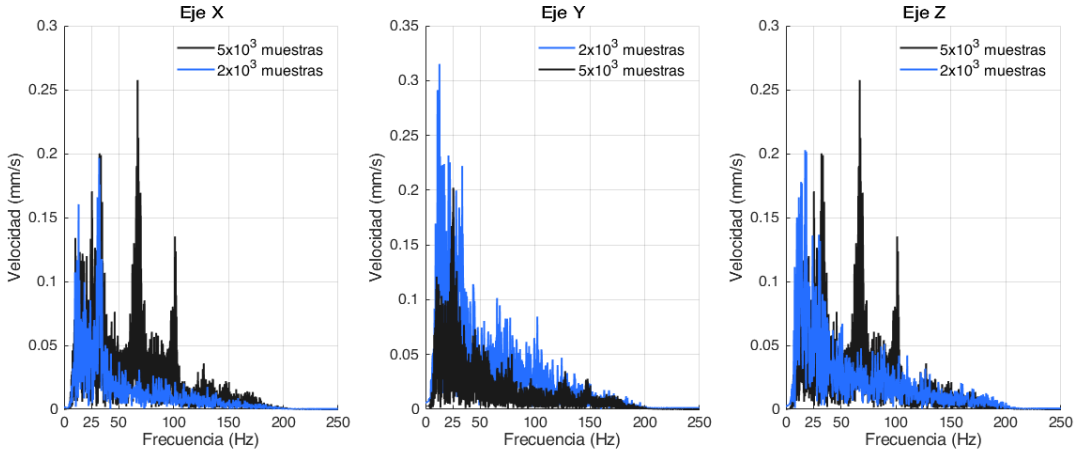


Fig. 8: Espectro de frecuencia de la velocidad para un Motor Nº 2 de 4 polos para distintos tiempos de registros.

5 Conclusiones

Este trabajo presentó la implementación de una WSN con el objetivo de medir, registrar y transmitir señales en tiempo real desde dos motores eléctricos. Para la transmisión de los datos se utilizó el protocolo ESP-NOW, que resultó ser una solución adecuada para la implementación de la red prototipo. Se realizaron mediciones sobre la carcasa de dos motores eléctricos de diferentes características y para diferente número de muestras. Con las señales de vibraciones mecánicas almacenadas se procesaron los datos mediante una transformada rápida de Fourier (FFT) a fin de visualizar el espectro en frecuencia en los ejes x, y, z. El incremento del registro de muestras permitió mejorar la resolución en frecuencia para identificar las frecuencias características como la 1X en la velocidad de la vibración mecánica. La correcta identificación de la componente de giro del rotor 1X es importante dado que las fallas en rodamientos, las desalineaciones del eje, los desbalances de masa pueden identificarse en los cambios de amplitud de sus armónicos múltiplos.

Durante los ensayos experimentales se realizaron varias pruebas de ajustes para evaluar el rendimiento de la transmisión de las mediciones y su alcance. En este aspecto se logró un rango máximo de 30 metros en línea de visión entre nodos para lograr una transmisión de datos completa. Una vez superada esta distancia se manifiestan pérdidas de paquetes de datos. La adición de obstáculos entre los nodos también afectó negativamente la tasa de transmisión de información.

Como futuros trabajos se realizaran ensayos con diferentes perturbaciones mecánicas para analizar el cambio de amplitud de las componentes espectrales con el fin de diagnosticar las fallas. También se plantea la posibilidad de que el nodo receptor se conecte a un ordenador controlado por una Raspberry Pi, a los efectos de ampliar la capacidad de almacenamiento de datos para lograr la visualización en tiempo real de las componentes espectrales, proporcionando una herramienta de detección y evaluación del estado de funcionamiento de los AE.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto de Investigación PICT-2021-I-INVI-00681 denominado Desarrollo de estrategias para la detección de averías en accionamientos eléctricos basado en WSN para la industria 4.0, financiado por el Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT) y acreditado por la Secretaria General de Ciencia y Tecnología (SGCyT) de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM).

Referencias

[1] K. Zhou, T. Liu, and L. Zhou, "Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges," in *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, 2015, pp. 2147–2152.

[2] R. Rizal Isnanto, Y. Eko Windarto, J. Imago Dei Gloriawan, and F. Noerdiyan Cesara, "Design of a robot to control agricultural soil conditions using ESP-NOW protocol," *2020 Fifth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, pp. 1–6, 2020.

[3] V. J. Hodge, S. O'Keefe, M. Weeks, and A. Moulds, "Wireless sensor networks for condition monitoring in the railway industry: A survey," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 1088–1106, 2015.

[4] T. Goktas, R. Er, F. Altunel, and M. Arkan, "IoT based multi-environmental sensing system: Monitoring of rotor fault in induction motors," in *2023 IEEE 14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2023, pp. 285–290.

[5] R. R. Patil, T. N. Date, and B. E. Kushare, "Zigbee based parameters monitoring system for induction motor," *2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, pp. 1–6, 2014.

[6] M. Şen and B. Kul, "IoT-based wireless induction motor monitoring," *2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET)*, pp. 1–5, 2017.

[7] M. C. Castello, J. J. Salerno, E. Marino, J. Chemes, and P. G. Rullo, "Desarrollo experimental de un sistema de monitoreo de vibraciones para aerogeneradores: Diseño, implementación y evaluación," *Observatorio de Energía y Sustentabilidad (OES - FRRo – UTN)*, 2024, disponible en: http://rid.unrn.edu.ar:8080/handle/20.500.12049/12251.

[8] International Organization for Standardization, *Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1: General guidelines*, ISO 20816-1:2016 ed. Vernier, Geneva, Switzerland: BSI, 2016.

[9] I. F. M. Lory, D. H. Refosco, M. A. Mazzoletti, O. M. Simonovets, and A. G. Garcilazo, "Implementación de una red de sensores inalámbrica: avances y mediciones en accionamiento eléctrico de uso industrial," in *XIV Jornada de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Extensión y Vinculación, Facultad de Ingeniería, UNaM.*, vol. 1, 2024, pp. 1–8.

[10] D. Urazayev, A. Eduard, M. Ahsan, and D. Zorbas, "Indoor performance evaluation of ESP-NOW," *2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, pp. 1–6, 2023.

[11] Espressif, "ESP-NOW wireless communication protocol-espressif systems," Available at https://www.espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now, accessed: 2025.

[12] D. Eridani, A. F. Rochim, and F. N. Cesara, "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)*, pp. 322–328, 2021.

[13] T. N. Hoang, S.-T. Van, and B. D. Nguyen, "ESP-NOW based decentralized low cost voice communication systems for buildings," *2019 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*, pp. 108–112, 2019.

[14] "espnow — support for the ESP-NOW wireless protocol — micropython latest documentation," Available at https://docs.micropython.org/en/latest/library/espnow.html, 2025, accessed: 2025.

[15] P. Donolo, C. Pezzani, G. Bossio, C. de Angelo, and M. Donolo, "Vibration magnitude analysis on induction motors of different efficiency classes due to voltage unbalance," in *2022 IEEE/IAS 58th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (ICPS)*, 2022, pp. 1–5.