



Módulo electrónico para dispositivo portable de monitoreo de la condición por vibraciones

Osniel Alejandro García Orihuela, Samuel Casanova Calzadilla, Fidel Ernesto Hernández Montero, Mario Luis Ruiz Barrios

RESUMEN

En el contexto industrial nacional, la implementación efectiva del mantenimiento predictivo se ve limitada por la indisponibilidad de sistemas de monitoreo accesibles y adaptados a las condiciones locales, lo que afecta la productividad y la eficiencia energética. El objetivo de este trabajo fue diseñar e implementar el módulo electrónico para un dispositivo portable de adquisición de datos de vibraciones en máquinas industriales. Para este propósito, se implementó un sistema de adquisición de datos utilizando un microcontrolador ESP32 y un conversor analógico-digital CS5343 de 24 bits, que digitaliza muestras de un sensor de vibración y las transmite por puerto USB a un teléfono móvil. Se diseñaron e implementaron tanto el hardware como el firmware, y se desarrollaron pruebas experimentales para evaluar el cumplimiento de los requisitos técnicos del sistema. Los resultados validaron que el módulo electrónico es capaz de muestrear con una frecuencia de hasta 24 kHz, exhibe una respuesta en frecuencia plana en el rango de 10 Hz – 10 kHz, y el nivel de ruido fue de 2.7 mVrms. Los resultados obtenidos validan la capacidad del módulo electrónico para realizar adquisición precisa de señales en análisis de vibraciones, lo que constituye un paso hacia la independencia tecnológica del país para este tipo de aplicaciones.

Palabras claves: digitalización de señales, módulo electrónico, adquisición de datos, análisis de vibraciones, mantenimiento predictivo.

ABSTRACT

In the national industrial context, the effective implementation of predictive maintenance is constrained by the lack of accessible monitoring systems adapted to local conditions, negatively impacting both productivity and energy efficiency. This work aims to design and implement the electronic module of a portable device for vibration data acquisition in industrial machinery. To this end, a data acquisition system was developed using an ESP32 microcontroller and a 24-bit CS5343 analog-to-digital converter, which digitizes signals from a vibration sensor and transmits them via USB to a mobile phone. Both hardware and firmware were designed and implemented, and experimental tests were conducted to assess compliance with the system's technical requirements. The results demonstrate that the electronic module achieves a sampling frequency of up to 24 kHz, exhibits a flat frequency response within the 10 Hz – 10 kHz range, and presents a noise level of 2.7 mVrms. These findings validate the module's capability for accurate vibration signal acquisition, representing a step forward toward the country's technological independence in this type of application.

Keywords: signal digitization, electronic module, data acquisition, vibration analysis, predictive maintenance

Electronic module for a portable vibration condition monitoring device

Recibido: 12/2025 Aceptado: 02/2026

1.- INTRODUCCIÓN

En la sociedad contemporánea, la disponibilidad de servicios esenciales y la producción de bienes de consumo están íntimamente vinculadas con la eficiencia energética, lo que demanda un uso racional de los recursos [1]. En este contexto, el monitoreo de la condición en máquinas de producción constituye una tarea fundamental en los programas de mantenimiento modernos para garantizar la máxima productividad [2,3]. La estrategia más alineada con este propósito es el mantenimiento basado en la condición, también conocido como mantenimiento predictivo, el cual requiere evaluar periódicamente el estado de los sistemas para detectar desviaciones respecto a su comportamiento esperado y tomar decisiones oportunas [4,5].

Los sistemas de monitoreo por condición (CMS) portables disponibles en el mercado son fabricados predominantemente por países tecnológicamente desarrollados y comercializados a precios elevados, lo que limita su adopción generalizada en el contexto cubano. Adquirir tecnología de un proveedor específico implica dependencia total de sus servicios de postventa, actualizaciones y soporte técnico, lo que conlleva un intercambio constante con especialistas foráneos y un incremento en los costos asociados [6].

Empresas cubanas de sectores estratégicos como las termoeléctricas, la Empresa de Mantenimiento a Centrales Eléctricas (EMCE) y los centrales azucareros han incorporado de forma limitada tecnología foránea de monitoreo y diagnóstico adquirida a precios considerablemente altos y frecuentemente no adaptada a las particularidades del entorno industrial nacional [6]. A esta situación se suma el hecho de que fabricantes cuyos sistemas están actualmente en uso en el país como PRUFTECHNIK y SCHENK han sido absorbidos por firmas estadounidenses o han decidido suspender sus relaciones comerciales con Cuba. Como resultado, dichos sistemas han perdido el respaldo de sus proveedores, imposibilitando el acceso a servicios de postventa, mantenimiento y actualizaciones necesarias [6].

Esta realidad aleja al país de los beneficios que ofrece el monitoreo de condición, especialmente en el marco del paradigma Industria 4.0, donde la integración de soluciones adaptadas a las necesidades del negocio resulta esencial para alcanzar mayores niveles de eficiencia y competitividad [6].

La indisponibilidad de sistemas accesibles y adaptados de monitoreo y diagnóstico industrial en el país limita la implementación efectiva del mantenimiento basado en la condición, afectando la productividad, la confiabilidad operativa y la eficiencia energética en el sector industrial.

Para resolver este problema se decidió desarrollar, de manera endógena, en el marco de un proyecto asociado a un Programa Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, una propuesta de sistema portable de monitoreo y diagnóstico industrial. Este esfuerzo ha involucrado el trabajo de un equipo multidisciplinario y el desarrollo de diversos componentes. En particular, este trabajo se dirige a diseñar e implementar uno de esos componentes: el módulo electrónico de un sistema de adquisición de datos para medir vibraciones mecánicas en máquinas industriales.

El resto del trabajo se estructura como sigue: la sección 2 describe la metodología de diseño e implementación del módulo; la sección 3 presenta los resultados de validación experimental; la sección 4 presenta una breve discusión de los resultados en comparación con otros trabajos similares; finalmente, en la sección 5 se exponen las conclusiones principales.

2.- METODOLOGÍA

El sistema portable de monitoreo y diagnóstico industrial desarrollado en el proyecto ya mencionado en secciones anteriores está compuesto esencialmente por tres módulos principales, que se emplearán según esquema mostrado en Fig. 1. Los módulos son los siguientes:

- Aditamento de fijación del teléfono móvil (interfaz Sensor de Aceleración - Teléfono Móvil): Constituye la envoltura física que integra el chasis y, en su interior, el módulo electrónico objeto de este trabajo. Este módulo electrónico es el responsable de digitalizar la señal proveniente del sensor piezoeléctrico de aceleración y entregarla al teléfono, vía conexión USB, para su procesamiento y registro.
- Teléfono Móvil.
- Computadora.

Este Aditamento, en conjunto con el Teléfono Móvil, constituyen el dispositivo portable colector y preanálisis de la vibración. En el Teléfono Móvil corre un programa que interactúa con el especialista y ejecuta algunas funciones útiles para esta etapa del proceso. Después de la campaña de registro y preanálisis, es posible descargar los datos en una base de datos en la Computadora. Un programa en la Computadora permite la realización de un análisis más profundo de los datos con el propósito de diagnosticar la condición de los sistemas bajo supervisión.

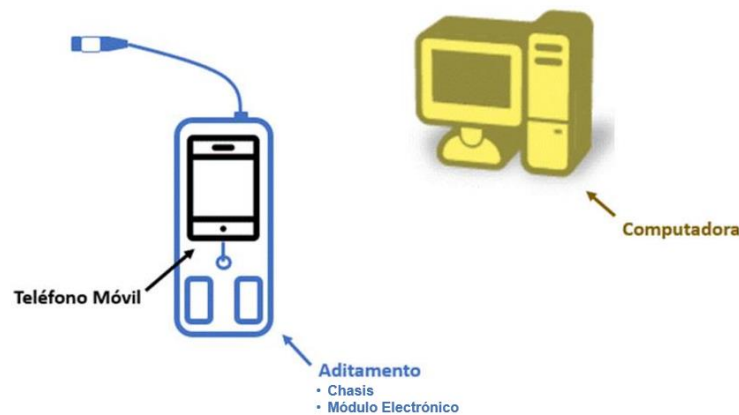


Figura 1

Módulos principales del sistema [6].

2.1.- REQUISITOS DE DISEÑO DEL MÓDULO ELECTRÓNICO

El diseño del módulo electrónico se realizó con base en determinados requerimientos fundamentales, definidos como parte del proyecto al cual tributa el presente trabajo. Estos requerimientos son:

- Módulo de adquisición de señales de vibraciones con capacidad de muestreo hasta 20 kHz, diseñado para captura confiable de señales dinámicas en maquinaria industrial, cumpliendo con requerimientos de diagnóstico predictivo [7].
- El módulo electrónico deberá contar con conexión por cable USB para comunicación serie mediante protocolo UART, permitiendo la transmisión de datos de vibración directamente a un teléfono móvil que actuará como dispositivo colector principal.
- La misma conexión por cable deberá proporcionar alimentación al módulo electrónico, tomando la energía necesaria (5 V) directamente del puerto USB del teléfono móvil, con un consumo máximo de 500 mA para cumplir con los estándares de carga USB.
- El módulo electrónico deberá presentar un diseño compacto y portátil.

En el análisis de vibraciones para diagnóstico de maquinaria industrial, el rango de frecuencia útil depende del tipo de máquina, sus componentes y las fallas a detectar. El rango más utilizado es de 10 Hz a 10 kHz [8], ya que cubre la mayoría de las fallas comunes, como desbalance, desalineación, problemas en engranajes y rodamientos [9]. Para garantizar una medición confiable en este rango, debe aplicarse el criterio de Nyquist, el cual establece que la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima de interés. Por lo tanto, si se desea analizar señales de hasta 10 kHz, se requiere una frecuencia de muestreo mínima de 20 kHz para evitar aliasing y mejorar la resolución espectral.

2.2.- MÓDULO ELECTRÓNICO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

En la Fig. 2 se muestra el diagrama de bloques del módulo electrónico para la adquisición de datos, el cual está constituido por los siguientes componentes:

- Acelerómetro piezoeléctrico, que es el encargado de transformar las vibraciones de la maquinaria a diagnosticar en impulsos eléctricos mediante el efecto piezoeléctrico.
- Conversor Analógico/Digital (A/D), el cual recibe la señal analógica proveniente del sensor piezoeléctrico mediante un cable coaxial, y es el encargado de digitalizar la señal analógica.
- Microcontrolador, el cual recibe la señal digital proveniente del Conversor A/D y la transmite al Teléfono Móvil a través de la interfaz USB.

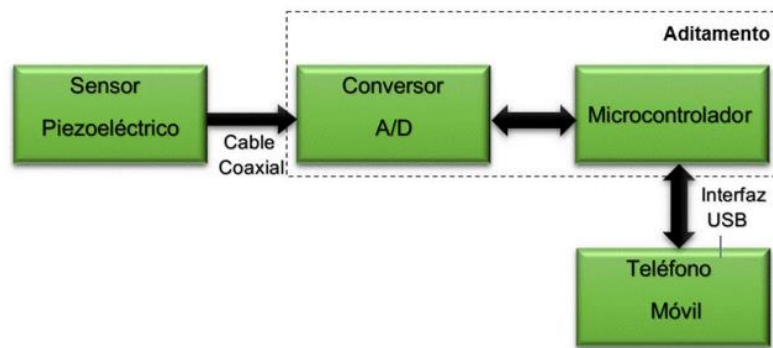


Figura 2
Diagrama de bloques del módulo electrónico [6].

2.3.- DISEÑO DEL MÓDULO ELECTRÓNICO

En el diseño del módulo electrónico se seleccionaron los componentes, se realizó el diseño de los diferentes circuitos eléctricos y posteriormente se diseñó la placa de circuito impreso (PCB). La selección de los componentes se realizó atendiendo a los requerimientos técnicos establecidos y a las características de los sistemas de adquisición de señales de vibración [10]. A continuación, se fundamenta la elección del microcontrolador, el convertor analógico-digital y el sensor de vibración.

Microcontrolador

Como unidad central de procesamiento se seleccionó la placa de desarrollo FireBeetle ESP32 (DFR048) [11], basada en el microcontrolador ESP32. Esta decisión se sustenta en su alto rendimiento, con capacidad para gestionar múltiples tareas de forma simultánea, y en la integración de periféricos de comunicación fundamentales: interfaz UART para la transmisión de datos al teléfono móvil vía USB, e interfaz I2S (Inter-IC Sound) para la comunicación de alta velocidad con el convertor analógico-digital externo. Adicionalmente, su bajo consumo energético, su relación costo-beneficio y su capacidad de procesamiento lo posicionan como una opción idónea para el desarrollo del módulo electrónico [12], en línea con las tendencias actuales en sistemas de monitoreo de bajo costo [13,14].

Convertor analógico-digital

Si bien el ESP32 incorpora internamente convertidores analógico-digital de aproximaciones sucesivas (SAR) con resolución de hasta 12 bits [12], estos no resultan adecuados para la aplicación de análisis de vibraciones industriales. Esta limitación obedece a dos factores fundamentales. En primer lugar, la comunidad de especialistas en monitoreo y diagnóstico por vibraciones reconoce que una resolución de 12 bits (4096 niveles) es insuficiente para capturar el amplio rango dinámico de las señales de vibración, donde fallos incipientes pueden manifestarse con amplitudes muy reducidas que se superponen a componentes de mayor magnitud [10]. En segundo lugar, se ha documentado que los convertidores analógico-digital del ESP32 presentan problemas de no linealidad y sensibilidad a la temperatura que comprometen la precisión de la medición [12]. Estudios recientes sobre sistemas de adquisición de vibraciones destacan la necesidad de superar las limitaciones de los convertidores analógico-digital convencionales, especialmente en aplicaciones que requieren alta fidelidad en la captura de señales débiles y de gran amplitud [15].

Para superar estas limitaciones, se seleccionó el convertor analógico-digital CS5343, un dispositivo completo para sistemas de audio digital basado en arquitectura Delta-Sigma [16]. Este convertor ofrece una resolución de 24 bits, lo que garantiza la precisión necesaria en la captura de amplitudes de vibración, y una frecuencia de muestreo de hasta 108 kHz por canal, superando el requisito de 20 kHz establecido en la sección 2.1. La arquitectura Delta-Sigma aporta ventajas mediante dos mecanismos: el sobremuestreo (*oversampling*), que reduce el piso de ruido al distribuir la energía del ruido de cuantificación en un ancho de banda mayor, y el conformado de ruido (*noise shaping*), que desplaza el ruido de cuantificación hacia frecuencias fuera de la banda de interés (10 Hz – 10 kHz), mejorando la relación señal-ruido (SNR) en la banda útil [10]. La importancia de una alta resolución y un bajo nivel de ruido en sistemas de medición de vibraciones, especialmente para el análisis de vibraciones a bajas frecuencias, ha sido recientemente demostrada por Janicki [10], quien concluye que el uso de convertidores analógico-digital de 24 bits y la selección cuidadosa del rango de medición son cruciales para minimizar errores que podrían superar los límites permitidos por las normas internacionales.

La comunicación entre el CS5343 y el ESP32 se realiza mediante el periférico I2S del microcontrolador. Este protocolo está específicamente diseñado para la transmisión eficiente de datos de audio y señales digitalizadas de alta resolución, permitiendo recibir los datos del convertor de forma síncrona sin ocupar recursos de procesamiento para la temporización de bajo nivel, lo que resulta esencial para mantener la integridad de los datos a las frecuencias de muestreo utilizadas.

Acelerómetro

Como sensor de vibración se seleccionó el acelerómetro piezoeléctrico 786B-10 [17]. Este sensor presenta una respuesta en frecuencia de 0.5 Hz a 14 kHz (con variación de ± 3 dB), que incluye la banda de análisis requerida de 10 Hz a 10 kHz. Su sensibilidad es de 100 mV/g con una tolerancia de ± 10 %, lo que proporciona una relación adecuada entre la magnitud de vibración y la tensión de salida. Los requerimientos de alimentación (2 mA de corriente y tensión entre 18 V y 30 V) [18] son compatibles con el circuito de acondicionamiento diseñado en la placa. La elección de un sensor piezoeléctrico IEPE responde a su amplia adopción en entornos industriales por su robustez, amplio rango dinámico y fiabilidad, en contraste con soluciones basadas en sensores MEMS que, aunque de menor costo, pueden presentar limitaciones en términos de relación señal-ruido y rango de frecuencia [19].

Para la integración de todos los componentes que conforman el módulo electrónico se diseñó una placa de circuito impreso que contiene el sistema de acondicionamiento del sensor piezoeléctrico, el convertor analógico-digital CS5343, la red de entrada analógica del convertor para el acondicionamiento de la señal y las conexiones entre los diferentes componentes.

En la Fig. 3 se muestran las conexiones entre los diferentes componentes del módulo electrónico.

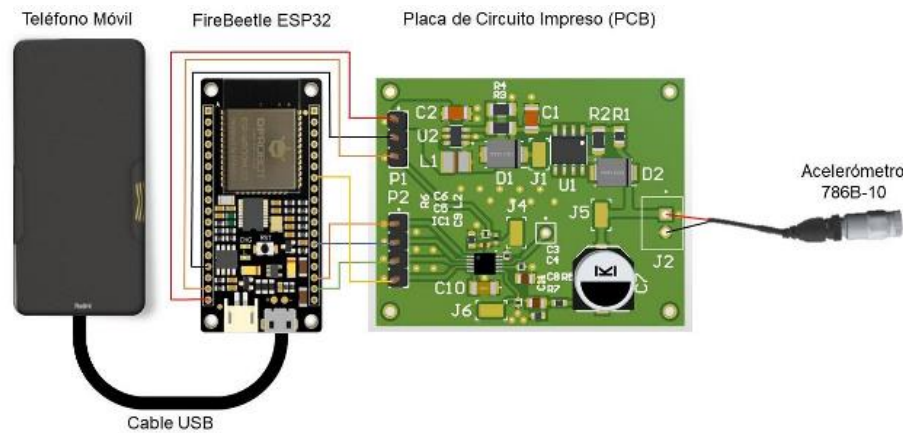


Figura 3
Diagrama de conexiones del módulo electrónico.

2.4.- SOFTWARE DEL MICROCONTROLADOR

El microcontrolador ESP32 del módulo electrónico tiene dos tareas principales: adquirir las muestras de vibración del acelerómetro y transmitir las muestras al teléfono móvil. El diagrama de flujo del funcionamiento del software se muestra en la Fig. 4.

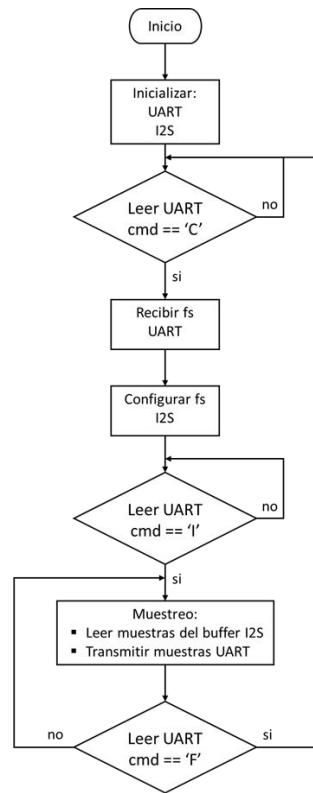


Figura 4

Diagrama de flujo del funcionamiento del software.

2.5.- PRUEBAS DE EVALUACIÓN DEL MÓDULO ELECTRÓNICO

Para evaluar el funcionamiento del módulo electrónico construido, se realizaron diferentes pruebas con equipamiento especializado (generador de señales, osciloscopio digital y teléfono móvil). El objetivo fue caracterizar el circuito de acondicionamiento, verificar el desempeño del convertor analógico-digital, cuantificar el ruido, determinar la máxima frecuencia de muestreo del sistema y validar por comparación con equipo de referencia. A continuación, se describen las principales pruebas de evaluación del módulo electrónico realizadas.

1. Caracterización del circuito de acondicionamiento del convertor: El objetivo de esta prueba fue caracterizar la respuesta en frecuencia del circuito de acondicionamiento y determinar su función de transferencia experimental. Primero se simuló el circuito en Multisim 14.2 para obtener las frecuencias de corte y la banda de paso teóricas. Luego, en el laboratorio, se aplicó un barrido de frecuencia discreto a la entrada del circuito, utilizando una señal sinusoidal de 1 volt pico a pico (Vpp). Para cada frecuencia, se midieron las tensiones de entrada (Vin) y salida (Vout) con un osciloscopio, se registraron en una tabla y se calculó la ganancia G(dB). Finalmente, se construyó un gráfico de Bode para comparar los resultados experimentales con los simulados y determinar las frecuencias de corte, correspondientes a una ganancia 3 dB por debajo del máximo.
2. Determinación del rango de conversión y saturación del convertor: Esta prueba tuvo como objetivo verificar que el convertor analógico-digital operara dentro de su rango de tensión especificado, garantizando una conversión lineal y una saturación adecuada. Se aplicaron niveles de tensión de referencia conocidos (0 V, mitad de escala y plena escala) a la entrada del convertor. Para cada nivel, se capturaron 100 muestras consecutivas y se calculó el código digital promedio. Para evaluar la saturación, se aplicó una tensión superior al límite de entrada y se verificó que el código de salida se mantuviera constante en su valor máximo.
3. Medición del nivel de ruido del módulo electrónico en reposo: El objetivo fue cuantificar el ruido generado por el circuito en ausencia de señal de entrada. Para ello, se cortocircuitó la entrada del circuito a tierra y se realizó la

captura de muestras. A partir de estos datos, se determinaron la tensión con valor cuadrático medio (RMS) y la tensión pico a pico del ruido.

4. Determinación de la máxima frecuencia de muestreo del sistema: Esta prueba se realizó para identificar la máxima frecuencia de muestreo que el sistema podía soportar sin degradar la integridad de la señal. Se aplicó a la entrada una señal sinusoidal de amplitud constante (1 Vpp) con una frecuencia menor que la mitad de la frecuencia de muestreo en prueba. Se capturaron las muestras y se realizó un análisis espectral de la señal digitalizada. La frecuencia de muestreo se incrementó progresivamente hasta que el espectro de la señal de salida dejó de corresponderse con el de la señal de entrada analógica.
5. Validación por comparación con equipo de referencia: Esta prueba tuvo como objetivo validar la precisión del módulo electrónico desarrollado mediante la comparación directa con un equipo de referencia comercial. Se midieron los niveles de vibración (valor RMS) de una maqueta de prueba utilizando simultáneamente el dispositivo portable desarrollado y el equipo de referencia. Los resultados obtenidos con ambos sistemas se compararon para evaluar la concordancia en las mediciones y, con base en esta comparación, realizar la calibración del dispositivo portable desarrollado.

3.- RESULTADOS

3.1.- PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA PCB

La técnica de fabricación de la PCB que se utilizó fue grabado químico con cloruro férrico donde se transfirió el diseño del circuito impreso a una placa de cobre mediante serigrafía y después se sumergió en cloruro férrico para disolver el cobre no protegido, dejando las pistas del circuito. Para concluir el proceso de fabricación de la PCB se le dio un acabado estañado para proteger la capa de cobre y mejorar el soldado de los componentes. En la Fig. 5 se muestra el resultado del proceso de fabricación de la PCB.

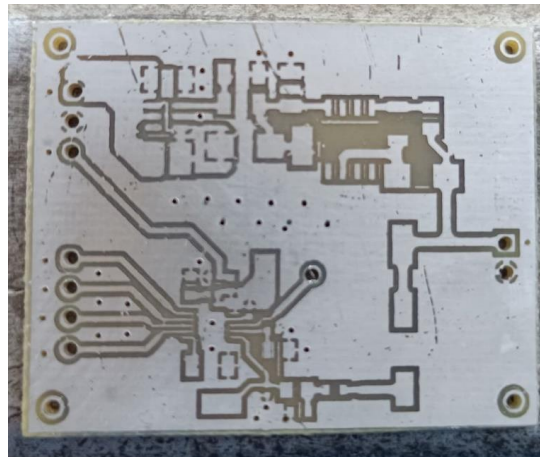


Figura 5

Placa de circuito impreso fabricada.

3.2.- MONTAJE DE LOS COMPONENTES EN LA PCB

El proceso de montaje del circuito impreso se ejecutó bajo una metodología escalonada para garantizar precisión. Antes de comenzar el montaje de los componentes se realizó una limpieza con alcohol isopropílico para eliminar cualquier tipo de impureza y suciedad que presente la PCB. Se utilizó un multímetro en el modo de continuidad para realizar pruebas a la placa con el objetivo de detectar fallas como cortocircuito entre pistas y circuito abierto.

En la Fig. 6 se muestra el resultado final del montaje de los componentes en la PCB.

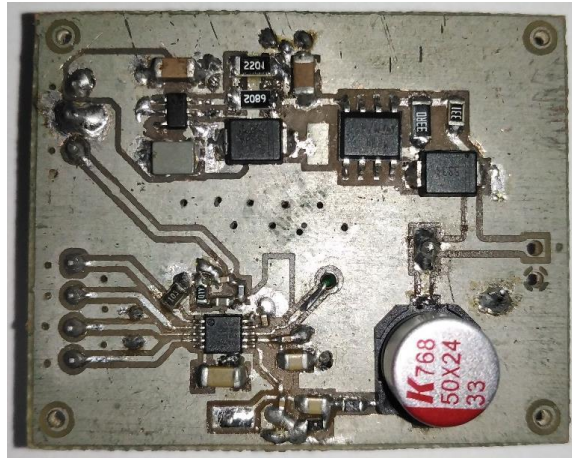


Figura 6

Placa de circuito impreso con los componentes.

3.3.- RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE EVALUACIÓN DEL MÓDULO ELECTRÓNICO

Las pruebas de evaluación del módulo electrónico construido se realizaron con equipamiento especializado como el generador de señales RIGOL DG1032Z [20] y el osciloscopio digital RIGOL DS1052E [21] con 2 canales.

Para realizar las pruebas de evaluación se conectó la salida del generador de señales a la entrada del circuito de acondicionamiento del convertor en conjunto con la sonda del canal 1 del osciloscopio para medir la tensión de entrada (V_{in}). La sonda correspondiente al canal 2 del osciloscopio se conectó a la salida del circuito de acondicionamiento del convertor para medir la tensión de salida (V_{out}), que a su vez es la tensión de entrada del convertor, y se aseguró una conexión a tierra común para evitar ruido.

En la Fig. 7 se muestran las conexiones del osciloscopio y generador de señales con el módulo electrónico.



Figura 7

Conexiones del módulo electrónico para las pruebas de evaluación.

3.3.1.- RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DEL CONVERTOR

La simulación en Multisim 14.2 mostró que el circuito de acondicionamiento presenta una respuesta en frecuencia con una banda de paso de ganancia constante de -6.02 dB, resultante del divisor de tensión de entrada. Las frecuencias de corte teóricas (a -9.02 dB) se ubicaron en 0.475 Hz (corte bajo) y 345 kHz (corte alto).

La validación experimental, cuyos resultados se comparan con la simulación en la Fig. 8, confirmó el comportamiento esperado. Las frecuencias de corte medidas fueron de 0.540 Hz para el corte bajo y 305 kHz para el corte alto, demostrando una alta correspondencia con los valores simulados y validando el diseño del circuito.

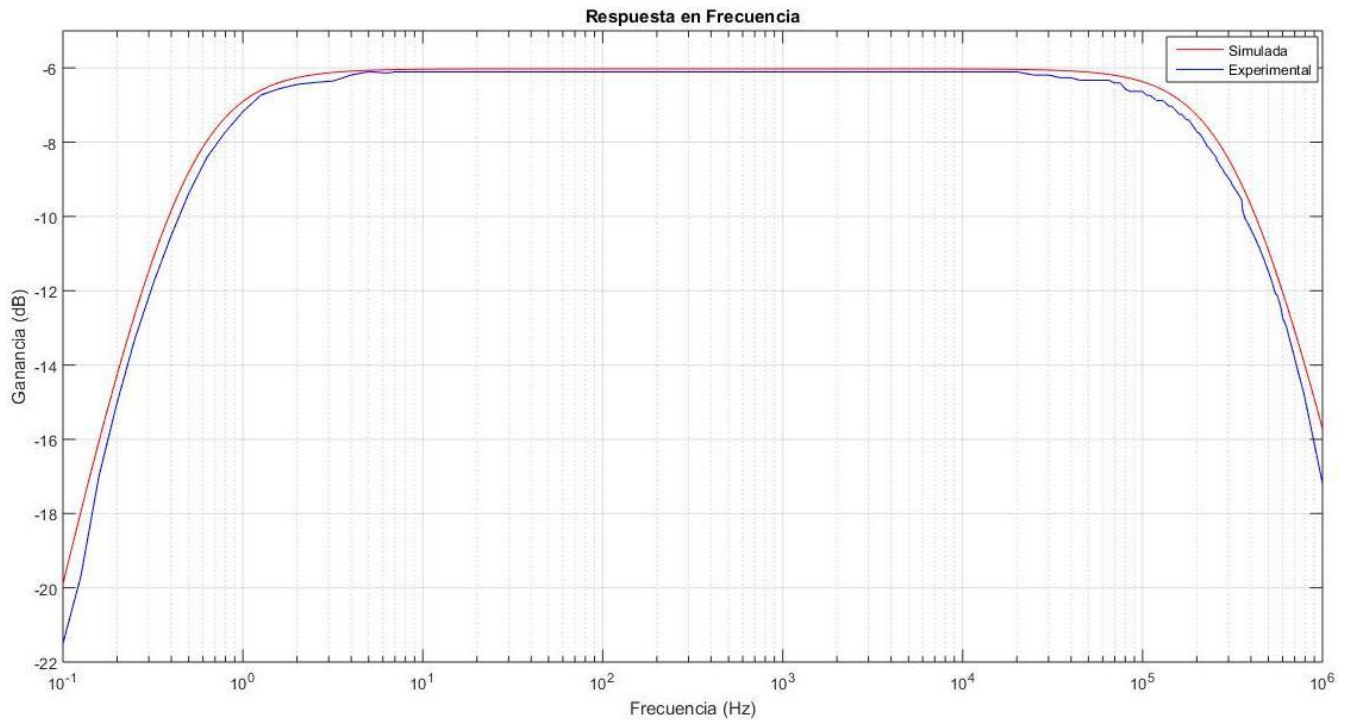


Figura 8

Comparación entre la respuesta en frecuencia simulada y la experimental.

3.3.2.- RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DEL RANGO DE CONVERSIÓN Y SATURACIÓN DEL CONVERTOR

La caracterización del convertor CS5343 demostró una relación lineal entre la entrada analógica y la salida digital en su rango de operación diferencial de ± 0.9372 V. Como se muestra en la Fig. 9, los códigos digitales promedio obtenidos para tensiones de referencia específicas (-0.94 V, -0.47 V, 0 V, $+0.47$ V, $+0.94$ V) confirmaron este comportamiento lineal, con una resolución efectiva de 0.1117 μ V/bit. Al aplicar una tensión de $+1.0$ V, que supera el límite superior, el convertor saturó correctamente, manteniendo un código constante de $8388607d$ ($0x7FFFFFFh$). Estos resultados validan que el convertor opera dentro de sus especificaciones técnicas.

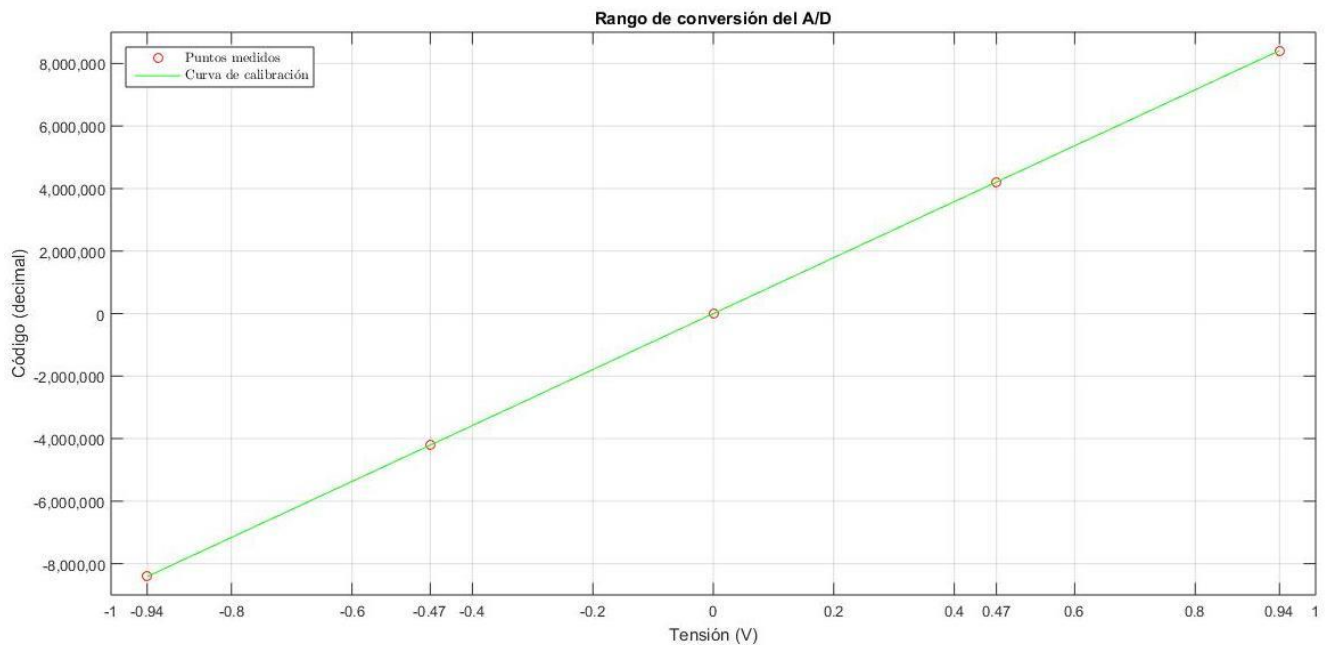


Figura 9
 Curva de calibración del A/D.

3.3.3.- RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DEL NIVEL DE RUIDO DEL MÓDULO ELECTRÓNICO EN REPOSO

La medición del ruido del módulo en reposo, con la entrada cortocircuitada a tierra, arrojó valores bajos que garantizan una adecuada relación señal/ruido. Como se presenta en la Fig. 10, el nivel de ruido equivalente medido fue de 2.7 mVrms (valor RMS) y 8.9 mVpp (valor pico a pico). Estos valores se calcularon a partir de las lecturas del software y la sensibilidad del acelerómetro, representando aproximadamente el 0.3% de la escala completa del convertidor, lo que valida la calidad del diseño y el montaje del circuito.

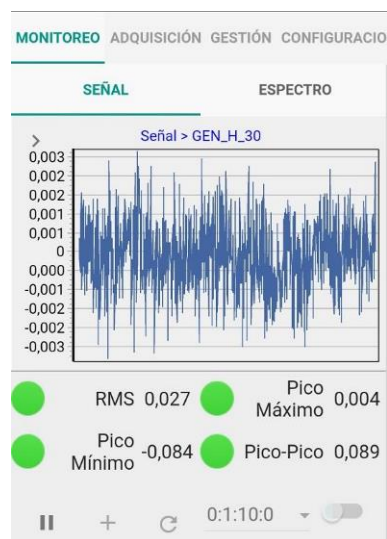


Figura 10
 Medición del nivel de ruido.

3.3.4.- RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LA MÁXIMA FRECUENCIA DE MUESTREO DEL SISTEMA

La prueba para determinar la máxima frecuencia de muestreo funcional del sistema validó que el módulo supera los requisitos de diseño. A la frecuencia objetivo de 20 kHz, el sistema reprodujo fielmente una señal de entrada de 8 kHz, como se verifica en el espectro de la Fig. 11. Incrementando la frecuencia de muestreo, se determinó que el límite operativo sin degradación de la señal se encuentra en 24 kHz, donde una señal de entrada de 10 kHz fue correctamente representada (Fig. 12). A 25 kHz, el análisis espectral mostró discrepancia con la señal de entrada (Fig. 13), estableciendo así el límite práctico del sistema. Este resultado confirma que el módulo cumple y supera el criterio de Nyquist para el análisis de vibraciones en el rango de interés (≤ 10 kHz).

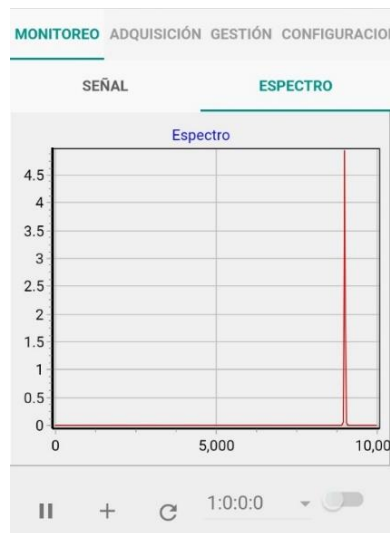


Figura 11

Espectro de la señal digitalizada con frecuencia de muestreo de 20 kHz y señal de entrada sinusoidal de 8 kHz.

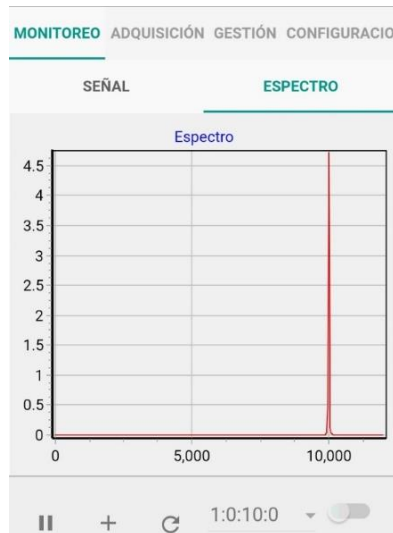


Figura 12

Espectro de la señal digitalizada con frecuencia de muestreo de 24 kHz y señal de entrada sinusoidal de 10 kHz.

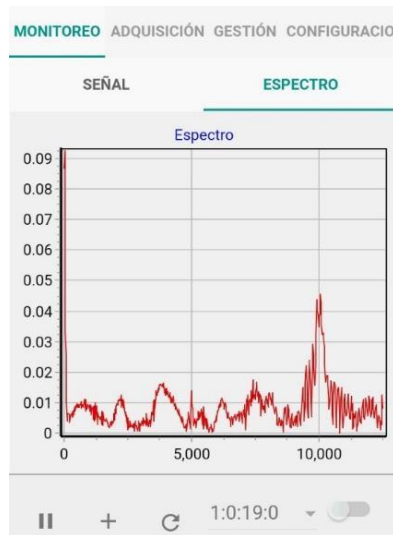


Figura 13

Espectro de la señal digitalizada con frecuencia de muestreo de 25 kHz, mostrando discrepancia espectral con la señal de entrada de 10 kHz.

3.3.5.- RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN POR COMPARACIÓN CON EQUIPO DE REFERENCIA

La validación experimental del módulo desarrollado se realizó mediante la comparación directa con el equipo comercial VIBXPERT II [22], tomado como referencia. Ambos sistemas se conectaron simultáneamente a una maqueta de prueba compuesta por un motor, un eje y dos rodamientos (Fig. 14). Los valores de vibración (RMS) medidos por el dispositivo portable desarrollado fueron consistentes y mostraron una alta correlación con los registrados por el equipo VIBXPERT II. Esta concordancia en las mediciones valida la precisión del módulo electrónico desarrollado y confirma su correcta calibración para aplicaciones de monitoreo de vibraciones.



Figura 14

Maqueta con el dispositivo desarrollado y el equipo de referencia VIBXPERT II conectados.

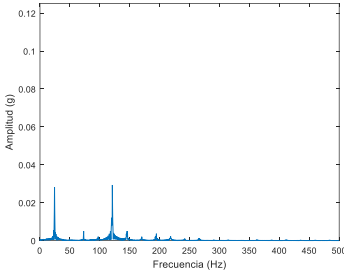
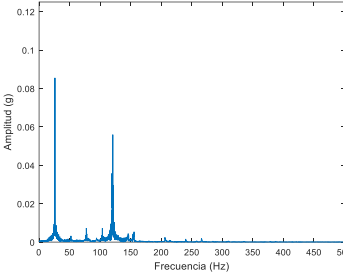
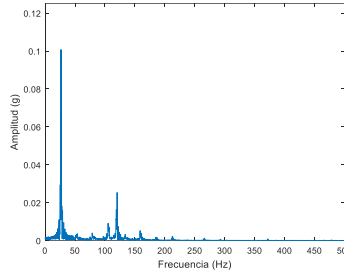
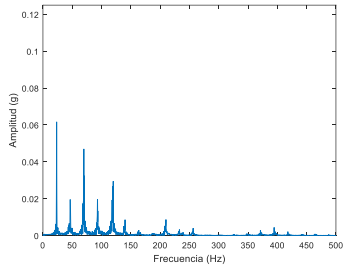
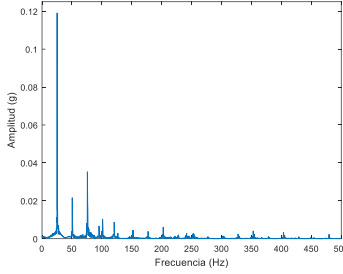
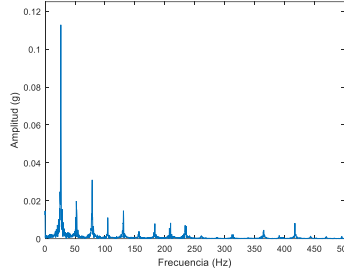
3.4.- PRUEBA DE TRABAJO SOBRE MAQUINARIA ROTATORIA REAL

El sistema desarrollado se validó en un ventilador real bajo diferentes condiciones operativas. Se registraron vibraciones en tres regímenes de velocidad de giro, tanto en condición normal como con un fallo simulado (roce de palas). Los espectros resultantes se muestran en la Tabla 1.

Se observó que las componentes espectrales aumentaban en amplitud con la velocidad del eje. Las frecuencias fundamentales medidas fueron 24.3 Hz, 25.9 Hz y 26.5 Hz. En la condición de fallo, aparecieron nuevas componentes espectrales y se incrementó el nivel global (RMS) de vibración. Este aumento refleja una desviación de energía hacia la emisión de vibración mecánica, lo que evidencia un impacto directo en la eficiencia energética de la máquina. Estos resultados demuestran que el sistema desarrollado posee capacidades de diagnóstico comparables a las de equipos foráneos de primer nivel.

Tabla 1

Espectros de vibración producida por un ventilador en 3 regímenes de operación y bajo 2 condiciones de operación.

	Velocidad de giro más baja	Velocidad de giro media	Velocidad de giro más alta
Espectro Vibración — Condición Normal	 RMS = 0.09 g	 RMS = 0.20 g	 RMS = 0.22 g
Espectro Vibración — Condición Fallo	 RMS = 0.18 g	 RMS = 0.20 g	 RMS = 0.25 g

4.- DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del módulo electrónico desarrollado para la adquisición de señales de vibración, cumpliendo y superando los requisitos de diseño establecidos. A continuación, se comparan estas prestaciones con las de sistemas reportados en la literatura reciente, utilizando como referencia los trabajos de revisión y desarrollo analizados.

En primer lugar, la frecuencia de muestreo máxima de 24 kHz alcanzada por el sistema supera el requisito inicial de 20 kHz y se compara favorablemente con otros desarrollos de propósito similar. De Fazio et al. [19] reportan un sistema basado en STM32 con frecuencias de muestreo de 22.2 kHz (un canal) y 12.5 kHz (dos canales), mientras que Suresh et al. [23] no especifican la frecuencia de muestreo de su prototipo basado en MEMS, aunque el sensor empleado (ADXL1002) tiene un rango de respuesta de hasta 11 kHz. Por otra parte, Liu et al. [15], utilizando una plataforma ZYNQ de altas prestaciones con un ADC de 24 bits (AD7768-4), alcanzan frecuencias de muestreo de hasta 256 kS/s, pero con una complejidad y costo significativamente mayores. El sistema aquí presentado, con 24 kHz, se sitúa en un punto óptimo para aplicaciones de monitoreo de maquinaria industrial, donde el rango de interés típico se extiende hasta 10 kHz [4,5,10,24].

En cuanto a la resolución y el ruido del sistema, la elección de un conversor analógico-digital de 24 bits (CS5343) resulta clave. Janicki [10] demuestra, mediante un análisis exhaustivo de tarjetas DAQ comerciales, que la medición de desplazamiento vibratorio (especialmente a bajas frecuencias) es extremadamente sensible al ruido del conversor analógico-digital, y que el uso de conversores de 24 bits y la selección cuidadosa del rango de medición son cruciales para minimizar errores que podrían superar los límites establecidos por normas internacionales como la ISO 10816-5. El nivel de ruido obtenido en el módulo (2.7 mVrms, equivalente a 0.027 g con el sensor de 100 mV/g) es bajo y representa aproximadamente el 0.3% de la escala completa. Este valor valida la calidad del diseño y es coherente con las prestaciones de sistemas de alta gama, como el analizado por Janicki [10] con la tarjeta NI 4492 de 24 bits, que presenta un ruido equivalente mínimo en sus rangos más bajos.

La respuesta en frecuencia plana del sistema en el rango de 10 Hz a 10 kHz satisface los requerimientos de la norma ISO 20816-5 para máquinas hidráulicas [4,5,24], así como las recomendaciones generales para el monitoreo de maquinaria rotatoria, donde las fallas comunes (desbalance, desalineación, defectos en engranajes y rodamientos) se manifiestan en este espectro [4,5]. La validación experimental mediante comparación directa con el equipo de referencia VIBXPERT II, siguiendo una metodología similar a la empleada por Suresh et al. [23] (quienes validaron su sistema contra un analizador OROS), confirma la precisión y fiabilidad de las mediciones realizadas con el módulo desarrollado.

Finalmente, es importante contextualizar la solución propuesta dentro de las tendencias actuales en monitoreo de condición. Las revisiones sistemáticas de Ghazali y Rahiman [4] y Tiboni et al. [5] coinciden en señalar que las técnicas de procesamiento en el dominio de la frecuencia, como el análisis espectral empleada en este trabajo, siguen siendo las más utilizadas (39% de los casos según [4]), y que existe una tendencia creciente hacia el uso de métodos de inteligencia artificial y aprendizaje profundo para el diagnóstico automático de fallos. En este sentido, el módulo desarrollado, con su capacidad de adquirir datos de alta calidad (24 bits, bajo ruido), sienta las bases para la futura implementación de algoritmos de diagnóstico basados en *machine learning*, como se propone en las líneas de trabajo futuro.

5.- CONCLUSIONES

El presente trabajo demostró la viabilidad técnica y económica de desarrollar un módulo electrónico portable para el monitoreo de vibraciones industriales, cumpliendo con los objetivos planteados en el marco del Programa Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación.

En primer lugar, se debe mencionar que los objetivos fueron cumplidos en términos generales. Estos consistían en diseñar e implementar el módulo electrónico de un dispositivo portable para la adquisición de datos de vibraciones, basado en un microcontrolador ESP32 y un conversor analógico-digital CS5343 de 24 bits.

El diseño e implementación del módulo electrónico superaron los requerimientos técnicos iniciales, alcanzando una frecuencia de muestreo de 24 kHz (20 % superior a lo especificado) y una resolución de 0.1117 $\mu\text{V/bit}$ (CS5343 de 24 bits).

Las pruebas experimentales validaron la precisión del sistema, con un ruido reducido a 2.7 mVrms (0.3 % de escala completa) y una respuesta en frecuencia plana (- 6.02 dB en el rango de 10 Hz - 10 kHz).

La validación por comparación directa con el equipo de referencia VIBXPERT II confirmó la precisión del módulo desarrollado, al obtenerse valores RMS de vibración consistentes y una alta correlación entre ambas mediciones. Este resultado valida la correcta calibración del dispositivo y su fiabilidad para realizar mediciones cuantitativas en aplicaciones de monitoreo industrial.

Las pruebas de trabajo realizadas sobre maquinaria rotatoria real demostraron la capacidad del sistema para identificar cambios en la condición operativa de la maquinaria. El sistema detectó correctamente la aparición de nuevas componentes espectrales y el aumento del nivel global de vibración (RMS) bajo condición de fallo, evidenciando su utilidad para el diagnóstico temprano y la evaluación del impacto energético de las fallas mecánicas.

La comparación con los trabajos de [10,15,19,23] evidencia que el módulo desarrollado ofrece una combinación equilibrada de prestaciones: una frecuencia de muestreo superior a sistemas de propósito similar [19,23], una resolución de 24 bits que lo alinea con soluciones de alta gama [10,15] y un nivel de ruido lo suficientemente bajo como para no comprometer la medición de vibraciones según estándares internacionales [4,5,10,24]. Todo ello, con una arquitectura basada en ESP32 que resulta más accesible y de menor costo que las plataformas FPGA/ZYNQ [15], lo que lo convierte en una solución viable para el contexto industrial objetivo.

Se propone integrar algoritmos de diagnóstico basado en aprendizaje automático en fases futuras.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación contó con el financiamiento de OGFPI, referencia PN211LH005-037.

REFERENCIAS

1. Martínez Pérez F, Gassinski L. La eficiencia energética y el papel del mantenimiento en la misma. *Ing Energética*. 2022;43(2):10-8.
2. Randall RB. *Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2021.
3. Ahmed H, Nandi AK. *Condition monitoring with vibration signals: Compressive sampling and learning algorithms for rotating machines*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2020.
4. Ghazali MHM, Rahiman W. Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: a systematic review. *Shock Vib*. 2021;2021(1):9469318.
5. Tiboni M, Remino C, Bussola R, Amici C. A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery. *Appl Sci*. 2022;12(3):972.
6. Montero FEH, Barrios MLR, Valdés DRH, Orihuela OAG, Calzadilla SC, Peña JCS. Propuesta de sistema portable de monitoreo y diagnóstico industrial. *Infomin*. 2024;16:<https://cu-id.com/2144/v16e06>.
7. ISO 13373-1:2002. Condition monitoring and diagnostics of machines [Internet]. Ginebra: ISO; 2002 [citado 19 de febrero de 2026]. Disponible en: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/02/18/21831.html>
8. ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration [Internet]. Ginebra: ISO; 2016 [citado 19 de febrero de 2026]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/63180.html>
9. Palomino Marín E. *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. La Habana: Editorial Félix Varela; 2012.
10. Janicki W. Limitations of using DAQ cards for absolute vibration measurement in hydraulic machines. *Appl Sci*. 2024;14(22):10175.
11. DFRobot. FireBeetle ESP32 IoT microcontroller [Internet]. [citado 19 de febrero de 2026]. Disponible en: <https://www.dfrobot.com/product-1590.html>
12. Espinosa-Gavira MJ, Agüera-Pérez A, Palomares-Salas JC, Sierra-Fernandez JM, Remigio-Carmona P, González de la-Rosa JJ. Characterization and performance evaluation of ESP32 for real-time synchronized sensor networks. *Procedia Comput Sci*. 2024;237:261-8.
13. Soto-Ocampo CR, Mera JM, Cano-Moreno JD, Garcia-Bernardo JL. Low-cost, high-frequency, data acquisition system for condition monitoring of rotating machinery through vibration analysis-case study. *Sensors*. 2020;20(12):3493.
14. Papathanasopoulos DA, Giannousakis KN, Dermatas ES, Mitronikas ED. Vibration monitoring for position sensor fault diagnosis in brushless DC motor drives. *Energies*. 2021;14(8):2248.
15. Liu F, Liu Y, Tuo X. Vibration signal acquisition system based on ZYNQ. En: *Proceedings of the 2025 2nd International Conference on Cloud Computing and Big Data*. New York: ACM; 2025. p. 134-40.
16. Cirrus Logic. CS5343/44 product data sheet [Internet]. [citado 19 de febrero de 2026]. Disponible en: https://statics.cirrus.com/pubs/proDatasheet/CS5343-44_F5.pdf

17. Wilcoxon Sensing Technologies. 786B-10 general purpose vibration sensor, 100 mV/g [Internet]. [citado 19 de febrero de 2026]. Disponible en: <https://wilcoxon.com/786b-10/>
18. Wilcoxon Sensing Technologies. General purpose accelerometer 786B-10 [Internet]. [citado 19 de febrero de 2026]. Disponible en: https://wilcoxon.com/wp-content/uploads/2022/11/786B-10_spec_99208B.3.pdf
19. De Fazio R, Spongano L, Messina A, Visconti P. A fully programmable DAQ board of vibrational signals from IEPE sensors: hardware and software design, performance analysis. *Electronics*. 2024;13(7):1187.
20. RIGOL. DG1000Z arbitrary waveform generators [Internet]. [citado 19 de febrero de 2026]. Disponible en: <https://www.rigolna.com/products/waveform-generators/dg1000z/>
21. RIGOL. 1000 series digital oscilloscopes [Internet]. [citado 19 de febrero de 2026]. Disponible en: <https://www.rigolna.com/products/digital-oscilloscopes/1000/>
22. Pruftechnik. VIBXPERT II vibration analyzer [Internet]. [citado 19 de febrero de 2026]. Disponible en: <https://www.pruftechnik.com/es/productos-y-servicios/sistemas-de-monitoreo-de-condici%C3%B3n/an%C3%A1lisis-de-vibraciones-y-equilibrado/analizador-de-vibraciones/vibxpert-ii/>
23. Suresh S, Yaswant S, Reddy TN, Vinod P. Preliminary investigation on the development of low-cost vibration based condition monitoring DAQ system in industry 4.0. *Manuf Technol Today*. 2024;23(5-6):1-7.
24. Hassan IU, Panduru K, Walsh J. An in-depth study of vibration sensors for condition monitoring. *Sensors*. 2024;24(3):740.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este trabajo declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Conceptualización:** Fidel Ernesto Hernández Montero, Mario Luis Ruiz Barrios
- **Curación de datos:** Osniel Alejandro García Orihuela, Samuel Casanova Calzadilla
- **Análisis formal:** Osniel Alejandro García Orihuela, Fidel Ernesto Hernández Montero
- **Adquisición de fondos:** Fidel Ernesto Hernández Montero
- **Investigación:** Osniel Alejandro García Orihuela, Samuel Casanova Calzadilla, Fidel Ernesto Hernández Montero
- **Metodología:** Fidel Ernesto Hernández Montero
- **Administración de proyecto:** Fidel Ernesto Hernández Montero
- **Recursos:** Osniel Alejandro García Orihuela, Samuel Casanova Calzadilla, Fidel Ernesto Hernández Montero
- **Software:** Osniel Alejandro García Orihuela
- **Supervisión:** Fidel Ernesto Hernández Montero, Mario Luis Ruiz Barrios
- **Validación - Verificación:** Osniel Alejandro García Orihuela, Samuel Casanova Calzadilla
- **Visualización:** Osniel Alejandro García Orihuela, Samuel Casanova Calzadilla.
- **Redacción - borrador original:** Osniel Alejandro García Orihuela
- **Redacción – revisión y edición:** Fidel Ernesto Hernández Montero

AUTORES

Osniel Alejandro García Orihuela, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), La Habana, Cuba, osnielaga@tele.cujae.edu.cu, No. ORCID: 0009-0001-7509-6081. Principales intereses de investigación: microcontroladores, procesamiento de señales, tecnología de monitoreo y diagnóstico industrial, IoT industrial y dispositivos *wearables*.

Samuel Casanova Calzadilla, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), La Habana, Cuba, samuelca@tele.cujae.edu.cu, No. ORCID: 0009-0004-0446-5574. Principales intereses de investigación: desarrollo de dispositivos *wearables* y sistemas embebidos para aplicaciones biomédicas.

Fidel Ernesto Hernández Montero, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), La Habana, Cuba, fhernandez@tele.cujae.edu.cu, No. ORCID: 0000-0002-5003-2807. Principales intereses de investigación: microcontroladores, procesamiento de señales, tecnología de monitoreo y diagnóstico industrial, IoT industrial, desarrollo de dispositivos *wearables* y sistemas embebidos para aplicaciones biomédicas.

Mario Luis Ruiz Barrios, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), La Habana, Cuba, mruizbarrios@gmail.com, No. ORCID: 0000-0001-7602-8948. Principales intereses de investigación: microcontroladores, procesamiento de señales, tecnología de monitoreo y diagnóstico industrial, IoT industrial.



Esta revista se publica bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional