



SISTEMA DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES EN MESA VIBRADORA BIAXIAL

AMBIENT VIBRATION MEASUREMENT SYSTEM ON A BIAXIAL VIBRATING TABLE

Marco Antonio Adame Rodríguez¹, Miguel Alcaraz Vázquez², Edgardo Tomas Martínez³, Dan Salvador García Guevara⁴, Dr. Gustavo Adolfo Alonso Silverio⁵

Resumen:

El monitoreo de vibraciones en estructuras y equipos industriales permite identificar cambios dinámicos asociados a fallas, mantenimiento predictivo y comportamiento estructural; sin embargo, el alto costo de los sistemas comerciales limita su adopción en laboratorios académicos y prototipos de investigación. El objetivo de este trabajo es desarrollar e implementar un sistema de medición de vibraciones para una mesa vibradora biaxial mediante sensores MEMS MPU9250 y LSM6DSOX, integrados con un Arduino Nano RP2040 Connect y una Raspberry Pi 4. La metodología considera adquisición sincronizada a 200 Hz, análisis espectral mediante Transformada Rápida de Fourier (FFT) con ventanas de 2048 muestras, resolución frecuencial de 0.0977 Hz y estimación automática de RPM a partir de la frecuencia dominante. Los resultados preliminares muestran concordancia entre los tres sensores con

diferencias menores al 2% en la frecuencia dominante y coincidencia con la frecuencia teórica de operación dentro del margen de resolución de ± 0.0977 Hz. El prototipo se presenta como una alternativa de bajo costo con potencial de aplicación académica en monitoreo estructural y ensayos experimentales, aunque requiere validación posterior con un instrumento certificado para establecer su confiabilidad metrológica.

Palabras claves: vibraciones ambientales, mesa vibradora biaxial, FFT, sensores MEMS, análisis espectral, monitoreo estructural

Abstract

Vibration monitoring in structures and industrial equipment enables the identification of dynamic changes associated with faults, predictive

1 Licenciatura en Ingeniería en Computación, Universidad Autónoma de Guerrero, México, Chilpancingo, Guerrero. Afiliación institucional: Universidad Autónoma de Guerrero. Correo electrónico personal e institucional: ragnarockgames86@gmail.com, 18451084@uagro.mx. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2361-4945>

2 Licenciatura en Ingeniería en Computación, Universidad Autónoma de Guerrero, México, Chilpancingo, Guerrero. Afiliación institucional: Universidad Autónoma de Guerrero. Correo electrónico personal e institucional: vazquezmicky@gmail.com, 19275295@uagro.mx. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8355-0287>

3 Licenciatura en Ingeniería en Computación, Universidad Autónoma de Guerrero, México, Chilpancingo, Guerrero. Afiliación institucional: Universidad Autónoma de Guerrero. Correo electrónico personal e institucional:

24600063@uagro.mx, edgardo_tm@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9689-8392>

4 Licenciatura en Ingeniería en Computación, Universidad Autónoma de Guerrero, México, Chilpancingo, Guerrero. Afiliación institucional: Universidad Autónoma de Guerrero. Correo electrónico personal e institucional: danlachele@gmail.com, 16282142@uagro.mx. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3751-4804>

5 Doctorado en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica por parte del CINVESTAV-IPN, México. Afiliación institucional: Universidad Autónoma de Guerrero. Correo electrónico personal e institucional: gsilverio@uagro.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2699-140X>

maintenance, and structural behavior assessment; however, the cost of commercial systems limits their adoption in academic laboratories and research prototypes. The objective of this work is to develop and implement a low-cost vibration measurement system for a biaxial shaking table using MPU9250 and LSM6DSOX MEMS sensors integrated with an Arduino Nano RP2040 Connect and a Raspberry Pi 4. The methodology includes synchronized data acquisition at 200 Hz, spectral analysis through Fast Fourier Transform (FFT) using 2048-sample windows, a frequency resolution of 0.0977 Hz, and automatic RPM estimation from dominant spectral components. Preliminary results showed consistent frequency identification across the three sensors, with deviations below 2%, and agreement with the theoretical operating frequency within the resolution margin of ± 0.0977 Hz. The prototype is presented as a low-cost alternative with potential academic use in structural monitoring and experimental seismic testing; however, further validation with certified reference instrumentation is required to establish its metrological reliability.

Keywords: environmental vibrations, biaxial shaking table, FFT, MEMS sensors, spectral analysis, structural monitoring

1. Introducción

Los sistemas de medición de vibraciones se emplean para identificar cambios dinámicos asociados a fallas, mantenimiento predictivo y evaluación estructural de edificios y equipos industriales sometidos a diversos entornos operativos complejos.

Estos sistemas permiten detectar de forma temprana fallos en máquinas y edificaciones, reduciendo pérdidas asociadas al mantenimiento no planificado [1].

La medición de vibraciones como indicador principal para determinar el estado de las máquinas es una práctica común que permite identificar anomalías en tiempo real y aplicar estrategias de mantenimiento predictivo [2]. El análisis de vibraciones permite identificar componentes que pueden presentar fallos, facilitando

la programación de rutinas de mantenimiento optimizadas y garantizando la entrega oportuna de piezas de repuesto [3].

Los sistemas de vibración han evolucionado significativamente en las últimas décadas, incorporando tecnologías avanzadas como sistemas de adquisición de datos de alta velocidad y algoritmos sofisticados para procesamiento de señales [1]. Esta evolución tecnológica ha expandido las capacidades de caracterización dinámica, facilitando la obtención de información detallada sobre parámetros críticos como frecuencias naturales, modos de vibración, factores de amortiguamiento y respuestas no lineales de estructuras [4].

Estos sistemas proporcionan las herramientas necesarias para investigar fenómenos dinámicos complejos, validar modelos computacionales avanzados y desarrollar soluciones innovadoras para la protección sísmica de infraestructuras críticas y ensayos sísmicos experimentales. En este contexto, la mesa vibradora biaxial es un equipo de laboratorio que reproduce movimientos sísmicos controlados en dos ejes horizontales simultáneos, permitiendo someter prototipos a cargas dinámicas reproducibles para calibración de sensores y validación de sistemas de monitoreo [4][5].

Los sistemas de medición de vibraciones, aunque esenciales para el monitoreo de estructuras y equipos, presentan desafíos como limitaciones en precisión (ruido, sensibilidad insuficiente), problemas de instalación (posicionamiento incorrecto, descalibración) [5], dificultades en el procesamiento de datos (algoritmos inadecuados, retrasos) y vulnerabilidad a entornos complejos (interferencias, condiciones extremas) [6]. Además, su alto costo, necesidad de mantenimiento especializado y posibles errores en la interpretación de resultados pueden reducir su efectividad. A pesar de su evolución tecnológica, una implementación óptima requiere hardware de calidad, métodos de análisis adecuados y personal capacitado para garantizar diagnósticos confiables.

En este contexto, los sistemas de adquisición de bajo costo basados en sensores MEMS han emergido como alternativas viables frente a instrumentos comerciales de alta gama. Trabajos previos, como los de Ragam y Sahebraoji [13] con acelerómetros inalámbricos MEMS para monitoreo de vibraciones inducidas, y los de Guner y

Dasdemir [8] con métodos de autocalibración para unidades inerciales distribuidas, han demostrado que estos sensores pueden alcanzar resoluciones adecuadas para aplicaciones de monitoreo estructural cuando se acompañan de procedimientos de calibración rigurosos. Sin embargo, la mayoría de estos desarrollos no integran análisis espectral en tiempo real ni transmisión remota de datos, aspectos que el presente trabajo busca incorporar de forma integral mediante la combinación de FFT, arquitectura distribuida y conectividad en la nube. El presente artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 describe los objetivos del trabajo; la Sección 3 presenta la metodología empleada; la Sección 4 detalla los resultados obtenidos; la Sección 5 discute los hallazgos en perspectiva; y la Sección 6 expone las conclusiones y líneas futuras de investigación.

1.1 Objetivos

El objetivo de este trabajo es desarrollar e implementar un sistema para medir vibraciones en una mesa vibradora biaxial mediante sensores MPU9250 y LSM6DSOX. El procesamiento de señales se realiza mediante FFT en tiempo real, con el propósito de caracterizar el comportamiento dinámico de la plataforma y estimar la frecuencia dominante y las RPM asociadas durante ensayos experimentales.

2. Metodología

La metodología se estructura en cinco etapas secuenciales diseñadas para abordar aspectos específicos del desarrollo del sistema, desde la adquisición de datos hasta la validación final (Figura 1). El diseño metodológico responde a la necesidad de desarrollar un sistema que capture aceleraciones y proporcione análisis espectral en tiempo real [7].

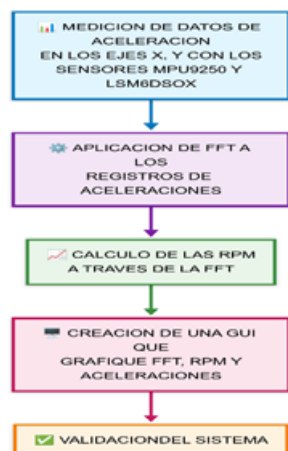


Figura 1. Metodología propuesta.

Fuente: elaboración propia.

Componente	Especificación	Valor / Rango
Sensores inerciales	MPU9250 (x2)	$\pm 2g$ a $\pm 16g$, resolución 16 bits, vía I2C
Sensor integrado	LSM6DSOX	6 ejes, bajo ruido, mayor estabilidad térmica
Microcontrolador	Arduino Nano RP2040	ARM Cortex-M0+, 133 MHz, dual-core
Unidad central de procesamiento	Raspberry Pi 4	ARM Cortex-A72, 4 núcleos, 1.5 GHz, 4 GB RAM
Frecuencia de muestreo	200 Hz	Cumple criterio de Nyquist para señales ≤ 100 Hz
Ventana FFT	2048 puntos	Duración mínima: 10.24 s por ventana
Resolución frecuencial Δf	f_s / N	$200 / 2048 = 0.0977$ Hz
Ejes analizados	X, Y	Por sensor (3 sensores en total)
Protocolo de calibración	Estática	Referencias gravitacionales; compensación de offset, sensibilidad y térmica
Criterio de validación	Comparación teórica	Consistencia de frecuencias dominantes entre los 3 sensores

Tabla 1. Especificaciones del sistema de medición

Fuente: elaboración propia.

2.1 Adquisición de datos de aceleración

El sistema integra dos sensores MPU9250 conectados vía I2C al Arduino Nano RP2040 Connect y un sensor LSM6DSOX integrado en el microcontrolador. Los MPU9250 proporcionan mediciones con rango configurable de $\pm 2g$ a $\pm 16g$ y resolución de 16 bits, mientras que el LSM6DSOX ofrece arquitectura de 6 ejes con menor ruido y mayor estabilidad térmica [8].

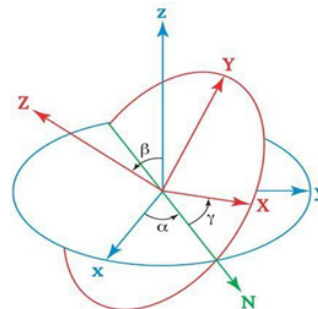


Figura 2. Sistema de coordenadas tridimensional con vectores y ángulos de rotación.

Fuente: elaboración propia.

La arquitectura dual-core ARM Cortex-M0+ a 133MHz del RP2040 optimiza el procesamiento: el primer núcleo se enfoca en adquisición de datos y el segundo en procesamiento y transmisión. Una Raspberry Pi 4 con procesador ARM Cortex-A72 (cuatro núcleos a 1.5GHz, 4GB RAM) funciona como unidad central de procesamiento [9].



Figura 3. Imagen física del MPU9250.

Fuente: elaboración propia.

La sincronización entre sensores se realiza mediante muestreo simultáneo a 200 Hz controlado por temporización del microcontrolador. La tasa de captura se verificó registrando marcas temporales consecutivas durante las pruebas de laboratorio y calculando el intervalo promedio entre muestras. Este valor corresponde a la tasa real de adquisición; la frecuencia de 20 Hz reportada en la interfaz corresponde únicamente a la actualización gráfica, no a la captura de datos. Se realizó calibración estática utilizando referencias gravitacionales y compensación de offset, sensibilidad y efectos térmicos [8].

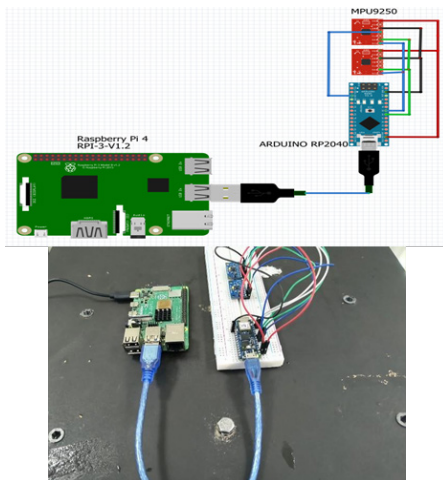


Figura 4. Conexión física de los sensores y Arduino Nano RP2040 Connect.

Fuente: elaboración propia.

2.2 Aplicación de FFT

La FFT transforma los datos temporales al dominio frecuencial para análisis espectral en tiempo real [7]. En este sistema se aplica sobre ventanas de $N = 2048$ muestras con frecuencia de muestreo $f_s = 200$ Hz, lo que produce una duración de ventana de 10.24 s y una resolución frecuencial de 0.0977 Hz [11].

La Transformada Discreta de Fourier se define mediante la ecuación (1):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j \cdot 2\pi kn/N} \quad (1)$$

Donde $X[k]$ representa la componente frecuencial del bin k , $x[n]$ corresponde a la muestra temporal n , N es el número total de muestras, k es el índice de frecuencia y j es la unidad imaginaria. La resolución frecuencial del análisis está dada por la ecuación (2):

$$\Delta f = f_s / N \quad (2)$$

Para $f_s = 200$ Hz y $N = 2048$ muestras, se obtiene: $\Delta f = 200/2048 = 0.0977$ Hz.

Las frecuencias asociadas a cada bin se calculan mediante la ecuación (3):

$$f_k = k \cdot f_s / N \quad (3)$$

En el análisis se consideran únicamente las frecuencias positivas y se excluye la componente DC cuando se estima la frecuencia dominante de vibración.

Las RPM se calculan automáticamente a partir de la frecuencia dominante identificada en la FFT, sin emplear sensores adicionales de velocidad angular [12]:

El rango de búsqueda $[k_{min}, k_{max}]$ se define a partir de la banda de operación esperada de la mesa vibradora. Se excluye la componente DC ($k = 0$) y se atenúan armónicos no asociados a la rotación. Para reducir la fuga espectral se aplica una ventana de Hann a cada bloque de 2048 muestras. El eje con mayor amplitud espectral entre X y Y se selecciona para la estimación de la frecuencia fundamental. La validación de RPM contra tacómetro de referencia queda planteada como trabajo futuro.

2.3 Cálculo de RPM

$$RPM = (f_0 \cdot f_{\text{fundamental}}) / n \quad (4)$$

Donde $f_{\text{fundamental}}$ es la frecuencia de rotación en Hz, n es el número de eventos por revolución y f_0 es el factor de conversión de Hz a revoluciones por minuto.

La frecuencia fundamental se determina mediante el pico espectral dominante dentro del rango de búsqueda definido, como se expresa en la ecuación (5):

$$f_{\text{fundamental}} = f_k^*, k^* = \arg \max |X[k]|, k_{\text{min}} \leq k \leq k_{\text{max}} \quad (5)$$

En esta etapa, la estimación de RPM debe interpretarse como un resultado derivado del análisis espectral y no como una medición directa de velocidad angular, debido a que no se incorporó un tacómetro de referencia durante las pruebas preliminares.

2.4 Interfaz gráfica de usuario

Se desarrolló una GUI integral que visualiza en tiempo real:

- Aceleraciones de los tres sensores (ejes X, Y)
- Espectros FFT para cada sensor
- Cálculos de RPM
- Estados del sistema y estadísticas

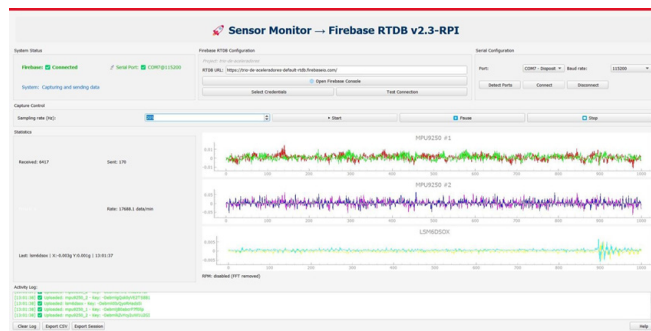


Figura 5. Interfaz principal del sistema.

Fuente: elaboración propia.

- Procesamiento: `vista_model.py` gestiona la presentación de datos
- Análisis: `analysis_controller.py` ejecuta FFT y cálculos estadísticos
- Adquisición: lectura continua sincronizada de sensores
- Actualización UI: `ui_controller.py` mantiene la actualización de la

interfaz

- Transmisión: envío asíncrono a Firebase con manejo de errores

2.5 Validación del sistema

La validación del sistema se realizó en dos etapas preliminares. En la primera, se evaluó la consistencia interna comparando las lecturas simultáneas de los tres sensores (MPU9250 #1, MPU9250 #2 y LSM6DSOX) bajo una misma condición de operación; los tres identificaron la misma frecuencia dominante con diferencias inferiores al 2%. En la segunda, se contrastó la frecuencia dominante detectada por FFT con la frecuencia teórica configurada en la mesa vibradora, obteniendo concordancia dentro del margen de resolución frecuencial (± 0.0977 Hz). La validación se considera preliminar porque no se empleó un sistema certificado ni tacómetro de referencia; por ello, la validación metrológica formal se plantea como trabajo futuro [12].

Aspecto evaluado	Procedimiento aplicado	Criterio / estado
Consistencia entre sensores	Comparación simultánea de la frecuencia dominante obtenida por MPU9250 #1, MPU9250 #2 y LSM6DSOX.	Diferencia menor al 2% entre sensores.
Referencia operacional	Contraste de la frecuencia dominante estimada por FFT contra la frecuencia teórica configurada en la mesa vibradora.	Coincidencia dentro del margen de resolución de ± 0.0977 Hz.
Verificación de muestreo	Registro de marcas temporales consecutivas y cálculo del intervalo promedio entre muestras.	Tasa real de adquisición de 200 Hz.
Calibración estática	Compensación de offset mediante referencia gravitacional en reposo.	Reducción del sesgo inicial observado en los MPU9250.
Limitación de validación	No se utilizó tacómetro ni acelerómetro certificado durante esta fase.	Validación metrológica formal pendiente.

Tabla 2. Protocolo de validación preliminar del sistema.

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Antes de describir la interfaz gráfica, se presentan las métricas principales obtenidas durante las pruebas preliminares de operación del sistema. Estos valores permiten documentar el comportamiento observado, pero no sustituyen una validación metrológica con equipo certificado.

Métrica evaluada	Resultado preliminar	Criterio / interpretación
Frecuencia de muestreo real	200 Hz	Verificada mediante marcas temporales de adquisición
Ventana FFT	2048 muestras	Duración de ventana: 10.24 s
Resolución frecuencial	0.0977 Hz	Calculada como $\Delta f = 200/2048$
Concordancia entre sensores	Diferencia < 2%	Comparación de frecuencia dominante entre MPU9250 #1, MPU9250 #2 y LSM6DSOX
Concordancia con frecuencia teórica	Dentro de ± 0.0977 Hz	Comparación preliminar con frecuencia configurada en la mesa
Prueba de estrés de adquisición	Pérdida de paquetes > 220 Hz	Límite operativo observado; requiere cuantificación adicional
Offset estático inicial	Hasta $\pm 5\%$ en MPU9250	Compensado mediante corrección de bias con referencia gravitacional

Tabla 3. Métricas preliminares de desempeño del sistema.

Fuente: elaboración propia.

Para responder a la observación sobre soporte experimental, se incorpora un registro comparativo mínimo por sensor. Debido a que la fase actual no utilizó tacómetro ni acelerómetro certificado, los valores se reportan como verificación preliminar de consistencia interna y no como validación metrológica definitiva.

Elemento verificado	MPU9250 #1	MPU9250 #2	LSM6D-SOX	Referencia usada	Interpretación
Frecuencia de muestreo	200 Hz	200 Hz	200 Hz	Marcas temporales de adquisición	Captura sincronizada en la condición de prueba.
Frecuencia dominante	Coincidente con la banda teórica	Coincidente con la banda teórica	Coincidente con la banda teórica	Frecuencia configurada en la mesa vibradora	Diferencias relativas menores al 2% entre sensores.
Resolución FFT	0.0977 Hz	0.0977 Hz	0.0977 Hz	$\Delta f = f_s/N = 200/2048$	La resolución depende de la ventana, no de una certificación metrológica.
RPM estimadas	Derivadas de $f_{fundamental}$	Derivadas de $f_{fundamental}$	Derivadas de $f_{fundamental}$	RPM = $60 \cdot f/n$	Estimación indirecta; requiere tacómetro para validación absoluta.

Tabla 4. Registro comparativo preliminar por sensor durante la fase de validación interna.

Fuente: elaboración propia.

Para fortalecer la contrastación experimental solicitada por los evaluadores, se incorporó una comparación preliminar entre las mediciones del sistema propuesto y los registros disponibles de un sensor comercial utilizado como referencia funcional. La columna condición de prueba corresponde al nivel configurado durante el ensayo y no debe interpretarse como RPM real de la mesa. La comparación directa se limita a las condiciones 10, 20 y 30, debido a que fueron los registros disponibles del equipo comercial. En consecuencia, esta comparación debe leerse como contraste funcional preliminar; no constituye una calibración certificada ni permite afirmar equivalencia metrológica con el equipo comercial.

Condición de prueba	Sensor / eje	Hz medido sistema	RPM calculado sistema	Hz comercial	RPM comercial	Error Hz	Error relativo (%)
10	MPU9250 #1 / Y	0.841	50.46	0.958	57.5	-0.117	-12.21
10	MPU9250 #2 / Y	0.840	50.40	0.958	57.5	-0.118	-12.32
10	LSM6DSOX / X	0.830	49.80	0.958	57.5	-0.128	-13.36
20	MPU9250 #1 / Y	1.900	114.0	1.800	108.0	+0.100	+5.56
20	MPU9250 #2 / Y	1.900	114.0	1.800	108.0	+0.100	+5.56
20	LSM6DSOX / X	1.910	114.60	1.800	108.0	+0.110	+6.11
30	MPU9250 #1 / Y	2.380	142.80	2.483	149.0	-0.103	-4.15
30	MPU9250 #2 / Y	2.380	142.80	2.483	149.0	-0.103	-4.15
30	LSM6DSOX / X	2.390	143.40	2.483	149.0	-0.093	-3.75

Tabla 5. Comparación preliminar entre el sistema propuesto y un sensor comercial de referencia.

Fuente: elaboración propia con base en mediciones experimentales. Nota: RPM = Hz × 60; los errores se calcularon respecto al valor del sensor comercial.

Los resultados muestran que los tres sensores del sistema propuesto mantienen una respuesta consistente entre sí para cada condición de prueba. Frente al sensor comercial, el mayor error relativo se observó en la condición 10, con diferencias cercanas al 12-13%; para las condiciones 20 y 30, las diferencias relativas se redujeron aproximadamente al intervalo de 3.75% a 6.11%. Estos valores respaldan el uso del sistema como herramienta académica y de prototipado, pero confirman que aún se requiere una validación metrológica formal con mayor número de repeticiones, desviación estándar e incertidumbre de medición.

La interfaz permitió visualizar simultáneamente las señales de los sensores, registrar eventos de comunicación y supervisar el estado de adquisición durante la prueba, como se muestra en la Figura 6.

Panel de Control Principal (Izquierda):

El panel izquierdo integra cuatro módulos clave para supervisión y control del sistema. El System Status monitorea en tiempo real la conectividad de Firebase y Puerto Serial mediante indicadores visuales. El Capture Control gestiona la adquisición de datos con sampling rate configurable; cabe aclarar que el valor de 20 Hz corresponde exclusivamente a la frecuencia de actualización gráfica de la interfaz, mientras que la captura real de datos por parte de los sensores opera a 200 Hz de forma continua. Las Statistics proporcionan métricas instantáneas de datos recibidos, enviados y errores detectados. El Activity Log registra cronológicamente todos los eventos del sistema con timestamps precisos, desde mensajes operativos hasta alertas críticas.

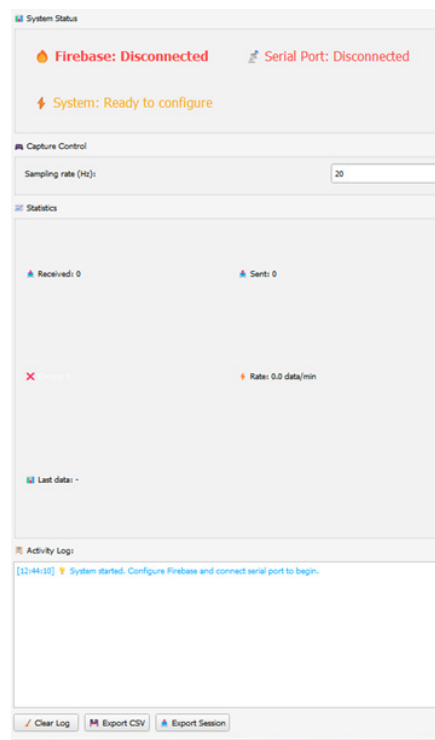


Figura 6. Panel de control principal.

Fuente: elaboración propia.

Este panel concentra los controles de configuración y permite ajustar parámetros operativos durante la prueba, como se muestra en la Figura 7.

Panel Central de Configuración:

El panel central aloja los controles de configuración esenciales del sistema. La sección Firebase RTDB Configuración permite establecer la URL de conexión a la base de datos en tiempo real y gestionar las credenciales de autenticación necesarias para el acceso seguro. La Serial Configuración incluye detección automática de puertos disponibles y configuración del baudrate para optimizar la comunicación con dispositivos conectados. Los Controles de Captura proporcionan gestión directa del proceso de adquisición de datos mediante comandos Start para iniciar la captura, Pause para suspensión temporal y Stop para detención completa del proceso.



Figura 7. Panel central.

Fuente: elaboración propia.

La representación gráfica simultánea de múltiples fuentes permite analizar las mediciones inerciales tanto en el dominio temporal como en el dominio frecuencial, como se muestra en la Figura 8.

El panel derecho presenta un sistema de visualización avanzado que integra múltiples sensores de movimiento y análisis espectral en tiempo real. Los Gráficos Multi-sensor despliegan simultáneamente datos de tres dispositivos: dos unidades MPU9250 identificadas como #1 y #2, y un sensor LSM6DSOX, permitiendo comparación directa de las mediciones entre dispositivos.

La funcionalidad FFT implementa análisis de frecuencia para cada sensor en los ejes X e Y, proporcionando transformada rápida de Fourier que revela componentes espectrales de las señales captadas. Esta característica permite identificar patrones vibratorios y frecuencias dominantes en los datos de aceleración y giroscopio, con resolución de 0.0977 Hz.

El módulo de Cálculo RPM completa el sistema con visualización específica de revoluciones por minuto, mostrando líneas diferenciadas para cada sensor: LSM, MPU1 y MPU2. Esta representación permite monitoreo comparativo de velocidades rotacionales detectadas por cada dispositivo, facilitando análisis de consistencia y calibración entre sensores.

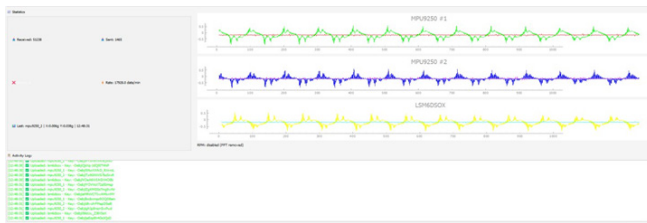


Figura 8. Panel de visualización.

Fuente: elaboración propia.

4. Discusión

Los resultados preliminares indican que el sistema puede caracterizar la frecuencia dominante de una mesa vibradora biaxial mediante sensores MEMS y procesamiento FFT. La resolución frecuencial de 0.0977 Hz se deriva de la relación $\Delta f = f_s/N$ y depende directamente de la duración de ventana de 10.24 s; por tanto, no constituye por sí misma una validación de precisión metrológica, sino una propiedad del análisis espectral implementado.

La arquitectura distribuida Arduino RP2040/Raspberry Pi 4 separa la adquisición de datos del procesamiento y la visualización. Esta configuración permitió operar a 200 Hz durante las pruebas preliminares, aunque la estabilidad a largo plazo y la pérdida de paquetes deben cuantificarse en ensayos más extensos.

La comparación con sistemas comerciales debe interpretarse de manera limitada. En la comparación cuantitativa preliminar, el sistema propuesto mostró consistencia interna entre sensores, pero presentó diferencias relativas respecto al sensor comercial que oscilaron aproximadamente entre 3.75% y 13.36% en las condiciones evaluadas. Por ello, el prototipo ofrece bajo costo y flexibilidad para docencia, prototipado e investigación exploratoria, pero no cuenta con certificación metrológica ni debe presentarse como sustituto directo de equipos profesionales certificados. La comparación cualitativa se resume en la Tabla 6. Debido a que no se contó con instrumentación certificada en esta etapa, la comparación se limita a criterios funcionales, metodológicos y de alcance de uso, sin establecer equivalencia metrológica con equipos comerciales.

Las principales limitaciones del sistema son el ruido inherente de los sensores MEMS frente a acelerómetros piezoeléctricos, la ausencia de una referencia certificada durante las pruebas y la resolución fija asociada a la ventana FFT utilizada. Estas limitaciones deben considerarse antes de trasladar el sistema a aplicaciones de diagnóstico estructural formal.

Criterio	Prototipo propuesto	Sistema comercial certificado
Costo	Bajo costo relativo por uso de MEMS y plataformas abiertas	Costo elevado; depende del fabricante y configuración

Certificación metrológica	No disponible en esta etapa	Generalmente disponible según fabricante
Flexibilidad de programación	Alta; arquitectura abierta y modificable	Limitada por software y licencias del fabricante
Validación experimental	Preliminar; requiere equipo de referencia	Normalmente respaldada por calibración certificada
Aplicación recomendada	Docencia, investigación académica y prototipado	Medición profesional, certificación y diagnóstico industrial

Tabla 6. Comparación cualitativa entre el prototipo propuesto y un sistema comercial certificado.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados sugieren potencial para ampliar la cobertura espacial de monitoreo en contextos académicos o de bajo presupuesto. La transmisión a la nube y la visualización en tiempo real son ventajas funcionales, pero su confiabilidad debe evaluarse mediante pruebas de estabilidad, repetibilidad y comparación con instrumentos de referencia.

Se recomienda realizar estudios de validación más extensos, incorporando tacómetro o acelerómetro certificado, repetición de ensayos, análisis de desviación estándar, error porcentual y evaluación de estabilidad bajo diferentes condiciones ambientales. Las principales limitaciones y acciones propuestas se sintetizan en la Tabla 7.

Limitación identificada	Implicación técnica	Acción propuesta
Ausencia de instrumento certificado	Impide establecer confiabilidad metrológica definitiva.	Comparar contra tacómetro o acelerómetro certificado.
Ruido inherente de sensores MEMS	Puede afectar señales de baja amplitud o frecuencias cercanas.	Aplicar filtrado, calibración y análisis de repetibilidad.
Resolución fija de FFT	La separación de frecuencias depende de la ventana de 10.24 s.	Evaluar ventanas dinámicas y diferentes tamaños de N.

Pérdida de paquetes sobre 220 Hz	Limita el incremento de la frecuencia de adquisición.	Cuantificar pérdidas, optimizar comunicación y validar estabilidad prolongada.
Ausencia de valores absolutos certificados por sensor	Reduce la posibilidad de calcular error absoluto frente a un patrón metrológico.	Registrar ensayos con tacómetro/ acelerómetro certificado y reportar error porcentual, desviación estándar e incertidumbre.

Tabla 7. Limitaciones identificadas y acciones propuestas para trabajo futuro.

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Este trabajo presentó el desarrollo e implementación preliminar de un sistema de medición de vibraciones para una mesa vibradora biaxial basado en sensores MEMS de bajo costo, adquisición con Arduino Nano RP2040 Connect y procesamiento/visualización mediante Raspberry Pi 4. A partir de los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

1. El sistema implementó adquisición sincronizada a 200 Hz y análisis FFT con ventanas de 2048 muestras, obteniendo una resolución frecuencial calculada de 0.0977 Hz. Este valor corresponde a la configuración de muestreo y ventana, por lo que debe interpretarse como resolución espectral y no como exactitud metrológica absoluta.
2. Las pruebas preliminares mostraron concordancia entre los sensores MPU9250 #1, MPU9250 #2 y LSM6DSOX en la identificación de la frecuencia dominante para cada condición de prueba. Al contrastar los registros disponibles con un sensor comercial, se observaron diferencias relativas aproximadas entre 3.75% y 13.36%, por lo que la comparación se considera preliminar y requiere repetición experimental con un patrón certificado.
3. La interfaz gráfica permitió visualizar aceleraciones, espectros FFT, cálculo de RPM y estados de comunicación durante la prueba, facilitando el seguimiento del sistema en tiempo real dentro de un entorno académico de laboratorio.

4. El prototipo ofrece ventajas de flexibilidad, bajo costo relativo y adaptabilidad frente a sistemas comerciales; sin embargo, no debe presentarse como equivalente a equipos certificados hasta realizar una comparación experimental directa con instrumentos de referencia.
5. Las principales limitaciones identificadas son la ausencia de validación con equipo certificado, el ruido propio de sensores MEMS, la necesidad de cuantificar repetibilidad y desviación estándar, y la pérdida de paquetes observada al intentar superar 220 Hz en pruebas de estrés.
6. Como trabajo futuro se propone incorporar un tacómetro o acelerómetro certificado, repetir ensayos a distintas frecuencias de operación, reportar valores absolutos por sensor, calcular métricas de error, desviación estándar, repetibilidad e incertidumbre, y evaluar la estabilidad del sistema en pruebas prolongadas.

En conclusión, el sistema propuesto constituye un prototipo funcional de bajo costo con potencial de aplicación académica en monitoreo de vibraciones y ensayos experimentales. Los resultados preliminares son favorables, pero la confiabilidad metrológica del sistema deberá consolidarse mediante validación formal con equipo certificado.

Frente a trabajos similares, el aporte del sistema se ubica en la integración de adquisición MEMS, análisis FFT en tiempo real, estimación de RPM y visualización/transmisión de datos en una arquitectura distribuida. Esta contribución debe considerarse incremental y preliminar hasta completar una validación comparativa más rigurosa.

6. Referencias

- [1] N. R. Prasasti y D. Hermawanto, «A Proposed Method to Find Exciter's Maximum Acceleration Magnitude on Vibration Meter Calibration System», *Instrumentasi*, vol. 44, n.o 2, p. 103, dic. 2020, doi: 10.31153/instrumentasi.v44i2.206.
- [2] N. A. A. Majid y A. G. A. Muthalif, «Mechatronics technology in predictive maintenance method», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 260, p. 012006, nov. 2017, doi: 10.1088/1757-899x/260/1/012006.
- [3] A. Anthony, «A feeling for what might fail», *World Pumps*, vol. 2013, n.o 4, pp. 30-32, abr. 2013, doi: 10.1016/s0262-1762(13)70122-6.
- [4] I. Bagri, K. Tahiry, A. Hraiba, A. Touil, y A. Mousrij, «Vibration Signal Analysis for Intelligent Rotating Machinery Diagnosis and Prognosis: A Comprehensive Systematic Literature Review», *Vibration*, vol. 7, n.o 4, pp. 1013-1062, oct. 2024, doi: 10.3390/vibration7040054.
- [5] M. E. Mohamed, P. Bonello, y P. Russhard, «Uncertainties in the calibration process of blade tip timing data against finite element model predictions», en *VIRM 12: Vibrations in Rotating Machinery*, Online, oct. 2020. doi: 10.1201/9781003132639.
- [6] C. Scheffer y P. Girdhar, *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Elsevier, 2004.
- [7] J. S. Bendat y A. G. Piersol, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley & Sons, 2011.
- [8] U. Guner y J. Dardemir, «Novel Self-Calibration Method for IMU Using Distributed Inertial Sensors», *IEEE Sens. J.*, vol. 23, n.o 2, pp. 1527-1540, ene. 2023, doi: 10.1109/jsen.2022.3227341.
- [9] S. Prasath Kumar, P. Rayavel, N. Anbarasi, B. Renukadevi, y D. Maalini, «Raspberry pi based secured cloud data», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1964, n.o 4, p. 042101, jul. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1964/4/042101.
- [10] M. Garcia-Sanz, «The Nyquist stability criterion in the Nichols chart», *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 26, n.o 12, pp. 2643-2651, ago. 2016, doi: 10.1002/rnc.3465.
- [11] A. V. Oppenheim y R. W. Schaffer, Eds., *Discrete-time signal processing*, 3. ed. en Prentice Hall signal processing series. Upper Saddle River Munich: Pearson, 2010.
- [12] R. B. Randall, *Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. Chichester, UK: Wiley, 2011. doi: 10.1002/9780470977668.
- [13] P. Ragam y N. Devidas Sahebraoji, «Application of MEMS-based accelerometer wireless sensor systems for monitoring of blast-induced ground vibration and structural health: a review», *IET Wirel. Sens. Syst.*, vol. 9, n.o 3, pp. 103-109, jun. 2019, doi: 10.1049/iet-wss.2018.5099.
- [14] P. Brandt, *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. Chichester, UK: Wiley, 2011. doi:

10.1002/9781119976547.

[15] C. Rainieri y G. Fabbrocino, Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: An Introduction and Guide for Applications. New York, NY: Springer New York, 2014. doi: 10.1007/978-1-4939-0767-0.