



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN PÓRTICO A ESCALA DE MÚLTIPLES
GRADOS DE LIBERTAD MEDIANTE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS REMOTO INTEGRADO
CON TECNOLOGÍA MEMS DE BAJO COSTO**

Sebastián López Moran y Lorena Muñoz López

Facultad de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana Cali

Tesis trabajo de grado

M.Sc. María Victoria Mondragon Maca

30 de mayo de 2026

Tabla de Contenido

Abstract.....	7
Resumen	8
1. Introducción.....	9
2. Problema de Investigación.....	11
2.1. Planteamiento del Problema	11
2.2. Pregunta de Investigación	13
3. Justificación del Trabajo de Grado	14
4. Objetivo Del Proyecto	16
4.1. Objetivo General.....	16
4.2. Objetivos Específicos	16
5. Marco de Referencia.....	17
5.1. Antecedentes.....	17
5.2. Estado del Arte	20
5.3. Marco Conceptual	28
5.3.1. Monitoreo de Salud Estructural (SHM).....	28
5.3.2. Sistema de Múltiples Grados de Libertad (MDOF)	28
5.3.3. Análisis Modal y Propiedades Dinámicas.....	29
5.3.4. Frecuencia Natural (f_n).....	29
5.3.5. Razón de Amortiguamiento	30
5.3.6. Formas Modales.....	31
5.3.7. Edificio a Cortante.....	32
5.3.8. Rigidez en Conexiones Soldadas	33
5.3.9. Análisis Modal Experimental (EMA).....	33
5.3.10. Sistemas Microelectromecánicos (MEMS)	34
5.3.11. Acelerómetros Triaxiales	35
5.3.12. Microcontrolador ESP32	36
5.3.13. Protocolo de Comunicación I2C.....	36
5.3.14. Teorema de Nyquist-Shannon	37
5.3.15. Efecto Aliasing.....	37
5.3.16. Detrending	38
5.3.17. Filtrado Digital Butterworth.....	39
5.3.18. Transformada Rápida de Fourier (FFT)	39

5.3.19.	Método de Welch	40
5.3.20.	Densidad Espectral Cruzada (CSD).....	47
5.3.21.	Función de Transmisibilidad Espectral Relativa Basada en CSD	47
5.3.22.	Método de Elementos Finitos (FEM)	48
5.3.23.	Criterio de aseguramiento modal (MAC).....	49
5.4.	Internet de las Cosas (IoT)	50
5.4.1.	Internet de las Cosas (IoT) Aplicado a la Ingeniería	51
6.	Desarrollo del Trabajo.....	52
6.1.	Diseño, Construcción y Montaje del Modelo Experimental.....	52
6.1.1.	Materiales	52
6.1.2.	Disposición Geométrica, Construcción y Ensamble.....	53
6.2.	Sistema de Adquisición de Datos (SAD).....	55
6.2.1.	Componentes Individuales del Sistema	56
6.2.2.	Diseño, Construcción y Ensamble del Sistema	61
6.2.3.	Fuente de Energía	61
6.2.4.	Instalación del Microcontrolador ESP32.....	62
6.2.5.	Integración ESP32 y MPU6050	62
6.2.6.	Instalación y Operatividad del Sensor en el Modelo	63
6.2.7.	Programación del Sistema de Adquisición de Datos (SAD) Mediante Arduino IDE.....	64
6.2.8.	Desarrollo de Página Web para el Funcionamiento de Sistema de Adquisición de Datos (SAD)	66
6.2.9.	Desarrollo de Programa Matlab para la Determinación de las Propiedades Dinámicas..	68
6.2.10.	Experimentación Práctica	70
6.3.	Modelo Numérico de Elementos Finitos y Análisis Dinámico del Pórtico a Escala (Comprobación Numérica).....	72
6.3.1.	Formulación del Elemento Viga – Columna.....	72
6.3.2.	Propiedades de la Sección Transversal	73
6.3.3.	Matriz de Masa Consistente	75
6.3.4.	Modelación del Amortiguamiento.....	78
6.3.5.	Solución del Problema Modal	79
7.	Resultados y Análisis	80
7.1.	Resultados de Procesamiento Experimental.....	80
7.2.	Resultados del Modelo Numérico	90
7.3.	Comparación entre Resultados Experimentales y Numéricos	92

7.3.1. Comparativo de Frecuencias la Comparación entre Frecuencias Naturales Experimentales y Numéricas.....	92
7.3.2. Comparativo de Comportamiento Modal de Resultados Experimentales y Numéricos..	94
7.4. Análisis Comparativo de Costos entre el Sistema de Adquisición de Datos (SAD) Implementado y Sistemas Comerciales de Adquisición Dinámica	98
Conclusiones	103
Recomendaciones.....	106
Referencias Bibliográficas	108
Anexos.....	121
Anexo 1 - Especificaciones Técnicas del IMU MPU 6050.....	121
Anexo 2 - Especificaciones Técnicas Placa de Desarrollo ESP32.....	123
Anexo 3 - Código Fuente del Firmware para Microcontrolador ESP32, Nodo Sensor Nivel 1.....	125
Anexo 4 - Código Fuente del Firmware para Microcontrolador ESP32, Nodo Sensor Nivel 2.....	127
Anexo 5 - Código Fuente del Firmware para Microcontrolador ESP32, Nodo Sensor Nivel 3.....	129
Anexo 6 - Código Fuente de la Página Web para el Control Experimental y Adquisición de Registros	131
Anexo 7 - Código Fuente para el Procesamiento de Señales y Cálculo de las Propiedades Dinámicas por El Método de Welch en MATLAB	138
Anexo 8 - Código Fuente para el Procesamiento de Señales y Cálculo de las Formas Modales en MATLAB.....	140
Glosarios de Términos Especiales	142

Índice de Figuras

Figura 1 Vista lateral y frontal del modelo	54
Figura 2 Módulo IMU MPU 6050	57
Figura 3 Placa de desarrollo ESP32	58
Figura 4 Módulo MB102	59
Figura 5 Portapilas AA X6	60
Figura 6 Mini Protoboard	61
Figura 7 Diagrama de conexiones SAD	63
Figura 8 Ubicación de los sensores en el modelo	64
Figura 9 Interfaz web para el control experimental y captura de registros.	67
Figura 10 Proceso experimental aplicando EMA	72
Figura 11 Registros de aceleración acondicionados mediante EMA bajo un impacto leve	80
Figura 12 Registros de aceleración acondicionados mediante EMA bajo un impacto moderado	81
Figura 13 Registros de aceleración acondicionados mediante EMA bajo un impacto fuerte	81
Figura 14 Espectro PSD adquirido mediante EMA bajo un impacto leve	82
Figura 15 Espectro PSD adquirido mediante EMA bajo un impacto moderado	83
Figura 16 Espectro PSD adquirido mediante EMA bajo un impacto fuerte	83
Figura 17 Formas modales experimentales	89
Figura 18 Formas modales del modelo numérico mediante FEM	91
Figura 19 Comparación de frecuencias naturales y evaluación del modelo numérico	93
Figura 20 Formas modales obtenidas mediante EMA (experimental) y FEM (numérico)	95
Figura 21 Matriz de correlación MAC entre formas modales EMA (experimental) y FEM (numérico)	97
Figura 22 Código fuente del firmware para microcontrolador ESP32, nodo sensor nivel 1	125
Figura 23 Código fuente del firmware para microcontrolador ESP32, nodo sensor nivel 2	127
Figura 24 Código fuente del firmware para microcontrolador ESP32, nodo sensor nivel 3	129
Figura 25 Código fuente de la página web para el control experimental y adquisición de registros	131
Figura 26 Código fuente para el procesamiento de señales y cálculo de las propiedades dinámicas por el método de Welch en MATLAB	138
Figura 27 Código fuente para el procesamiento de señales y cálculo de las formas modales en MATLAB	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Rangos de discrepancia en la determinación de las propiedades dinámicas	25
Tabla 2	Valores referenciales de propiedades dinámicas determinados en diversos estudios	27
Tabla 3	Características geométricas de las platinas que componen el modelo	52
Tabla 4	Características del material y los elementos que componen el modelo.....	53
Tabla 5	Número de elementos que conforman del modelo.....	53
Tabla 6	Masa de los elementos que configuran el modelo	55
Tabla 7	Tipo de pruebas experimentales desarrolladas	71
Tabla 8	Propiedades geométricas y dinámicas del pórtico según modelación numérica.....	74
Tabla 9	Masas consideradas en el modelo numérico	77
Tabla 10	Frecuencias naturales del pórtico para cada modo de vibración bajo un impacto leve	84
Tabla 11	Frecuencias naturales del pórtico para cada modo de vibración bajo un impacto moderado	85
Tabla 12	Frecuencias naturales del pórtico para cada modo de vibración bajo un impacto fuerte	85
Tabla 13	Frecuencias naturales promediadas	85
Tabla 14	Razón de amortiguamiento para cada modo de vibración bajo un impacto leve	86
Tabla 15	Razón de amortiguamiento para cada modo de vibración bajo un impacto moderado	87
Tabla 16	Razón de amortiguamiento para cada modo de vibración bajo un impacto fuerte	87
Tabla 17	Razón de amortiguamiento promedio para cada modo de vibración.....	87
Tabla 18	Frecuencias naturales y experimentales obtenidas a partir del cálculo de las formas modales.....	96
Tabla 19	Comparación de tecnologías de acelerómetros empleados en SHM.....	99
Tabla 20	Comparación de tecnologías de acelerómetros empleados en SHM.....	101
Tabla 21	Especificaciones técnicas del IMU MPU 6050	121
Tabla 22	Especificaciones técnicas placa de desarrollo ESP32	123

Abstract

The high investment required to monitor a structure, stemming from equipment costs and the application of specialized methods, represents a barrier to its implementation, especially in developing countries. Additionally, considering that these regions are located in high seismic hazard zones, the risk and vulnerability of populations and infrastructure increase. As an alternative to this problem, this work presents the implementation of a low-cost Data Acquisition System (DAQ) with embedded Micro-Electromechanical Systems (MEMS) sensors, installed on a scale-model steel shear frame designed with three Degrees of Freedom (3DOF). These are deployed in strategic zones for the proper collection of high-quality records through Experimental Modal Analysis (EMA). The purpose is to determine the dynamic properties of the model, provide an accurate diagnosis of the structural condition, and demonstrate that these types of alternatives are viable.

Keywords: Structural Health Monitoring (SHM), MEMS Sensors, Experimental Modal Analysis (EMA), Dynamic Properties, Seismic Vulnerability, Low-cost.

Resumen

La elevada inversión para monitorear una estructura, derivada del costo de los equipos y la aplicación de métodos especializados, representa un impedimento para su aplicación, especialmente en países con recursos limitados. Adicionalmente, si se considera que estas regiones se ubican en zonas de amenaza sísmica alta, se incrementa el riesgo y la vulnerabilidad de las poblaciones y la infraestructura. Como alternativa a este problema, se presenta la aplicación de un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) con sensores de Sistemas Microelectromecánicos (MEMS) incorporados de bajo costo, instalados en un pórtico metálico a escala diseñado a cortante de tres Grados de Libertad (3GDL). Estos se disponen en zonas estratégicas para una adecuada recolección de registros con alta calidad mediante un Análisis Modal Experimental (EMA). La finalidad es determinar las propiedades dinámicas del modelo, brindar un diagnóstico preciso del estado de la estructura y demostrar que este tipo de alternativas son viables, económica y operacionalmente, en el campo del Monitoreo de Salud Estructural (SHM).

Palabras clave: Monitoreo de Salud Estructural (SHM), Sistemas Microelectromecánicos MEMS, Análisis Modal Experimental (EMA), Propiedades Dinámicas, Vulnerabilidad Sísmica, Bajo Costo.

1. Introducción

Colombia está ubicada en una zona de alta sismicidad, condicionada por su configuración tectónica asociada a la confluencia de las placas de Nazca, Suramérica y el Caribe (Arcilla et al., 2020a). Esta interacción geológica ha originado sismos de importancia histórica con consecuencias devastadoras en núcleos poblacionales, como los terremotos de Popayán (1983) y Armenia (1999); por lo tanto, un gran porcentaje del territorio nacional está expuesto a riesgos potenciales que afectan la integridad de las edificaciones. Dicha vulnerabilidad se debe a diversos factores tales como deficiencias en las medidas de preparación y prevención, desactualización normativa, urbanización no planificada y demora en la toma de decisiones para intervenciones requeridas en infraestructura, lo cual comprende aspectos geográficos, socioeconómicos y demográficos (Withington, 2008).

Se vuelve imperativa la aplicación de métodos vanguardistas como el Monitoreo de la Salud Estructural (Structural Health Monitoring o SHM, por sus siglas en inglés) integrado con tecnología de sensores para obtener y emplear registros de la respuesta dinámica de las estructuras civiles, con la finalidad de determinar su operatividad actual y el nivel de posibles lesiones. En este campo se establece el desarrollo de instrumentos tecnológicos y algoritmos computacionales que procesen la respuesta estructural a través de la recopilación de datos (Farrar et al., 2001; Lynch y Loh, 2006). Estos procesos permiten determinar propiedades como frecuencias naturales, razón de amortiguamiento y formas modales, entre otros, lo que describe el comportamiento dinámico del sistema frente a diversos tipos de vibración.

La implementación de estos sistemas, que precisa de equipos especializados, puede ser considerada limitada debido a su alto costo de adquisición y solo factible para edificaciones relevantes (Komarizadehasl et al., 2022). Esta situación restringe la aplicación masiva en países con limitaciones de recursos. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo se centra en desarrollar un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) con sensores de Sistemas Microelectromecánicos (Micro–Electro–Mechanical Systems o MEMS, por sus siglas en inglés) incorporados de bajo costo, con la finalidad de obtener los parámetros dinámicos en un pórtico metálico de Tres Grados de Libertad (3GDL) a escala, mediante la implementación del Análisis Modal Experimental (Experimental Modal Analysis o EMA, por sus siglas en inglés). Estos sistemas se consideran eficaces al suministrar resultados confiables dentro de herramientas de monitoreo estructural, con la capacidad de capturar vibraciones (Di Nuzzo et al., 2017) en diversos tipos de estructuras; lo que finalmente permite optimizar los recursos de mantenimiento y prevención de fallas catastróficas; lo que representa un ahorro significativo a largo plazo (Grosse et al., 2006).

2. Problema de Investigación

2.1. Planteamiento del Problema

La concentración poblacional mundial y las diversas actividades económicas en grandes ciudades han generado que el proceso de crecimiento urbano se ubique en zonas reducidas, lo que aumenta la vulnerabilidad de un número masivo de personas e infraestructura expuestas en este limitado espacio ante la afectación de un solo evento (Perlo Cohen, 2000). Según Perlo Cohen (2000), esta tendencia gana fuerza en grandes metrópolis de más de diez millones de personas que no cuentan con una adecuada gestión de riesgos, por la falta de recursos. En este contexto, una acelerada expansión sin una regulación ni planificación, en conjunto con edificaciones construidas en regiones de alta sismicidad que no responden a los códigos de sismorresistencia, exacerba la problemática; especialmente en países en desarrollo con una marcada debilidad institucional y económica.

El territorio colombiano, ubicado en la región occidental de Suramérica, se sitúa dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, donde la actividad de placas de la corteza terrestre se interrelaciona a través de procesos de expansión y colisión que originan movimientos telúricos (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2009). Para el control de la vulnerabilidad en construcciones colombianas ante el aumento poblacional, los estudios de amenaza sísmica nacional se vuelven esenciales; por consiguiente, el diseño de nuevas edificaciones y el reforzamiento de la infraestructura existente, de acuerdo con los niveles de amenaza, resultan

imperativos para mitigar el riesgo físico, económico, social y ambiental en el territorio (Salgado et al., 2010a).

Por este motivo, el SHM es un método vanguardista que se encarga de inspeccionar las estructuras ante vibraciones que afecten su integridad. Esto implica un nuevo paradigma para el diseño de códigos y especificaciones basados en factores de seguridad a causa de la incertidumbre (Karbhari y Ansari, 2009b). Bajo esta misma perspectiva del autor mencionado, el diseño moderno se fundamenta en la evaluación y el monitoreo permanente del riesgo y la salud estructural. Por medio de este método, es factible identificar rápidamente el rendimiento de una estructura ante eventos sísmicos, con el objeto de decidir sobre la reocupación, reforzamiento o demolición (Farrar y Worden, 2013a).

Es en este punto donde los sensores MEMS cobran relevancia, ya que permiten definir el comportamiento de las estructuras monitorizadas con la capacidad de proporcionar datos fidedignos del estado actual de la edificación. Esto optimiza la identificación y prevención de degradaciones causantes de posibles catástrofes. La ejecución de sistemas convencionales y tradicionales presenta un gran inconveniente debido a la elevada inversión para la adquisición de equipos especializados para este fin, por lo cual, el desarrollo de los MEMS se considera una alternativa viable en el análisis de vibraciones, dada su asequibilidad económica en comparación con otros sensores como los piezoeléctricos. Por lo tanto, el empleo de esta tecnología permite obtener datos similares a los registrados con métodos tradicionales que implementan equipos de gran valor (De Carvalho Alves, 2015). Basado en lo mencionado, la aplicación de sistemas compuestos por sensores y microcontroladores ESP32, a través de EMA,

permite capturar los datos necesarios para determinar las propiedades dinámicas de las edificaciones, con la finalidad de realizar un monitoreo estructural adecuado.

2.2. Pregunta de Investigación

Con base en lo planteado anteriormente, el presente proyecto pretende dar respuesta a la siguiente pregunta:

¿Es el Sistema de Adquisición de Datos (SAD) con sensores MEMS incorporados de bajo costo una alternativa operacionalmente viable para capturar señales fidedignas de un pórtico a escala en la determinación de las propiedades dinámicas?

3. Justificación del Trabajo de Grado

Una proporción importante del territorio colombiano se encuentra expuesta a amenaza sísmica alta debido a la interacción tectónica entre las placas de Nazca, Suramérica y el Caribe, condición que incrementa la probabilidad de afectación sobre la integridad y la operatividad de la infraestructura construida (Arcilla et al., 2020b). Aunque la mitigación del riesgo se apoya en la normativa de diseño y en los estudios de amenaza, persisten brechas asociadas a edificaciones anteriores a actualizaciones reglamentarias, así como a restricciones técnicas, institucionales y económicas que dificultan procesos oportunos de evaluación e intervención (Salgado et al., 2010b). En este contexto, el SHM constituye una herramienta de apoyo para la toma de decisiones, pues permite interpretar la respuesta vibratoria de una estructura e identificar variaciones en los parámetros dinámicos tales como frecuencias naturales, amortiguamiento y formas modales, que pueden asociarse con cambios de rigidez o la aparición de daños (Farrar y Worden, 2013b).

Sin embargo, la adopción extendida de sistemas SHM sigue limitada por el costo de la instrumentación especializada y por la complejidad operativa de muchas configuraciones tradicionales, lo que restringe su aplicación en entornos académicos y en contextos con recursos reducidos (Komarizadehasl et al., 2022a). En ese marco, los modelos estructurales a escala y los ensayos en laboratorio ofrecen una base adecuada para evaluar, bajo condiciones controladas, si una alternativa de bajo costo puede captar información vibratoria con calidad suficiente para la identificación modal, esta validación resulta necesaria porque el desempeño de sensores MEMS no depende únicamente de su disponibilidad o bajo precio, sino también de

aspectos como el nivel de ruido, la frecuencia de muestreo, la resolución, la sincronización y el tratamiento posterior de la señal (Özdemir y Kömeç, 2024a).

Desde esta perspectiva, la pertinencia del presente trabajo no radica únicamente en proponer una solución económicamente accesible, sino en examinar con criterio técnico su alcance real para aplicaciones de caracterización dinámica. La investigación aporta evidencia experimental sobre la implementación de un sistema de adquisición basado en sensores MEMS y microcontroladores ESP32, aplicado a un pórtico metálico a escala y contrastado con herramientas consolidadas de análisis, como el EMA y la Modelación por Elementos Finitos (Finite Element Modeling o FEM por sus siglas en inglés). En consecuencia, el estudio contribuye a establecer criterios de uso para este tipo de instrumentación, delimitar sus posibilidades y restricciones, y respaldar el desarrollo de metodologías experimentales más accesibles para la enseñanza, la investigación y la evaluación preliminar de estructuras.

4. Objetivo del Proyecto

4.1. Objetivo General

Validar la eficacia de un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) con sensores MEMS incorporados de bajo costo para la identificación de las propiedades dinámicas en un pórtico metálico a escala, mediante la comparación entre resultados experimentales y numéricos, con miras a su aplicación en proyectos de Monitoreo de Salud Estructural (SHM).

4.2. Objetivos Específicos

Implementar un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) de bajo costo basado en sensores MEMS y microcontroladores ESP32 para la captura de señales de aceleración en un pórtico metálico a escala.

Determinar las propiedades dinámicas (frecuencias naturales y modos de vibración) del modelo a escala mediante un Análisis Modal Experimental (EMA) en conjunto con el procesamiento digital de señales de aceleración capturadas.

Evaluar la precisión del sistema propuesto mediante la comparación de las propiedades dinámicas obtenidas experimentalmente con las estimadas en un modelo numérico de elementos finitos (FEM).

5. Marco de Referencia

5.1. Antecedentes

De acuerdo con Bacuilima y Barbecho (2022a), la seguridad estructural ha evolucionado desde inspecciones visuales periódicas hacia sistemas de monitoreo continuo, ya que estos permiten la obtención de información continua para dar seguimiento a las tendencias asociadas al detrimento, la pérdida de capacidad por condiciones operativas, y a cambios progresivos de la estructura. Aunado a esto, se contempla el registro de condiciones extremas entendidas como sismos; hecho que, en conjunto con la evaluación visual de los daños, convierte al SHM en una herramienta muy útil para la cuantificación del daño y la determinación de su posible reocupación inmediata, repotenciación o demolición.

Este tipo de sistemas ha sido ampliamente aplicado recientemente, destacándose en diversas estructuras, principalmente en puentes de gran longitud y relevancia ubicados en países como Japón, China, Italia, Portugal, Estados Unidos y Suiza (Bacuilima y Barbecho, 2022a). No obstante, con referencia a estos autores, dichos sistemas requieren una gran densidad de sensores que, distribuidos de manera óptima, reducen de manera significativa los costos de inversión en contraste con el empleo de equipos convencionales. Adicionalmente, desde la perspectiva de las edificaciones, la mayoría de los equipos instalados pretenden mejorar el entendimiento de los mecanismos de carga y, de esta manera, obtener los parámetros fundamentales de vibración de la edificación y su desempeño sísmico.

En este contexto, el monitoreo basado en vibraciones requiere implementar una medición compuesta por sensores, los cuales constituyen el componente fundamental para la adquisición de datos propios del comportamiento de la estructura. Bajo esta perspectiva, existen numerosos tipos de sensores que se clasifican según la propiedad que se desea caracterizar, tales como aceleración, desplazamiento, velocidad, tensión, deformación, temperatura, humedad entre otros. De este modo, el acondicionamiento de la señal, la adquisición de los datos, el almacenamiento y el posterior procesamiento influyen directamente en la calidad de la información obtenida.

La presente investigación evalúa la aplicabilidad de sensores MEMS integrados a una plataforma de adquisición de datos a través de microcontroladores referencia ESP32, para la caracterización del modelo. Se destacan por su reducido tamaño, bajo consumo energético y, sobre todo, por su bajo coste de producción (Ramos Domínguez, 2025a); tales características permiten su integración en sistemas de monitoreo de fácil implementación. Conforme al autor referenciado, estos dispositivos miden las aceleraciones en los tres ejes cartesianos (X, Y y Z), lo cual amplía su aplicabilidad en el análisis dinámico de estructuras.

Según Ramos (2025a), a pesar de que los acelerómetros MEMS presentan ventajas representativas, sus funciones están condicionadas por factores como el nivel de ruido, la resolución y las limitaciones propias del proceso de adquisición de los datos; por lo tanto, su implementación y monitoreo requiere una evaluación crítica de su precisión y confiabilidad frente a sensores de referencia. Para lo cual, se deben considerar efectos como el *aliasing*, relacionado con la insuficiencia frecuencial del muestreo; el *DC offset*, entendido como

desfases de baja frecuencia ocasionados por la electrónica del sensor; y el *spectral leakage*, relacionado con las limitaciones de las ventanas temporales finitas. Es de este modo que surge la implementación de filtros digitales para la extracción de información útil del ruido, lo cual garantiza la adquisición de información real y de calidad (Ramos Domínguez, 2025a).

Como caso experimental, se tiene su implementación sobre una viga metálica empotrada, para la cual validaron el desempeño de un sistema basado en sensores MEMS que evidencia una alta concordancia entre las frecuencias naturales obtenidas experimentalmente y aquellas calculadas mediante un modelo numérico (MIDAS), con desviaciones dentro de los márgenes esperados para sistemas de bajo costo; hecho que demuestra la estabilidad en la adquisición y transmisión de datos (Ramos Domínguez, 2025a). No obstante, de acuerdo con este autor, aunque estos resultados son favorables, es importante señalar que la validación se realizó en una estructura simple (viga), lo cual implica un comportamiento dinámico menos complejo que el de sistemas estructurales tipo pórtico; en este sentido, persiste la necesidad de evaluar este tipo de tecnologías en configuraciones más complejas, donde factores como la interacción entre elementos, la rigidez de las conexiones y la identificación de múltiples modos de vibración introducen mayores desafíos en la medición y el análisis, con el propósito de respaldar su aplicabilidad en entornos de laboratorio y, posteriormente, en esquemas de monitoreo continuo.

Desde el punto de vista dinámico, como lo plantea Cabaleiro (2023), la rigidez de las conexiones incide directamente en la estimación de las frecuencias naturales del sistema. De este modo, la calibración de modelos numéricos mediante resultados experimentales ha

permitido identificar rangos de frecuencia para estructuras tipo pórtico, lo cual reporta valores desde aproximadamente 1.76 Hz en los primeros modos hasta superiores a 50 Hz en modos de orden mayor, los cuales sirven como referencia para procesos de validación experimental.

En esta misma línea, se ha evidenciado experimentalmente que la configuración de las uniones puede modificar de forma significativa la rigidez global de estructuras ensambladas y, por ende, su respuesta dinámica. Investigaciones en pórticos instrumentados y ensayados mediante excitación controlada han demostrado que variaciones en el tipo de conexión generan cambios medibles en las frecuencias naturales y en las formas modales (Cabaleiro Nuñez, 2023). Según el autor, esto pone en evidencia que la idealización de uniones perfectamente rígidas, comúnmente adoptada en modelos teóricos, puede introducir discrepancias relevantes frente al comportamiento real; en consecuencia, resulta necesario considerar explícitamente la rigidez de las conexiones y sus posibles desviaciones al momento de interpretar resultados experimentales y llevar a cabo procesos de calibración de modelos.

5.2. Estado del Arte

La salud estructural representa un apartado fundamental en el estudio de la ingeniería civil; por ello, el SHM, aplicado en diversas tipologías estructurales, se ha vuelto indispensable para el desarrollo de este proceso. Conforme al vertiginoso avance tecnológico de los sensores y su competencia en la ejecución de tareas especializadas (como la adquisición de señales, poco probables hace unos años a causa de su elevado costo), los monitoreos vanguardistas de estructuras están capacitados para la captura de señales de aceleración en la determinación de

las propiedades dinámicas estructurales mediante protocolos operacionales o experimentales. Dicho método ha incursionado exitosamente en diversos lugares, lo que propicia un gran impacto en países desarrollados de Norteamérica, Asia y Europa (Bacuilima & Barbecho, 2022a).

Entre los casos más relevantes en la aplicación del SHM por medio de instrumentación tecnológica, sobresale el del Centro Financiero Ping-An (Shenzhen, China), el cual es el cuarto edificio más alto del mundo (600 m). Esta edificación dispone de un sistema modular integrado de monitoreo, considerado referente a nivel mundial en rascacielos por conformarse de 533 sensores ubicados en trece pisos diferentes; adicionalmente, dispone de redes de Bragg en fibra (FBG) para medir temperatura y deformaciones. También se incluyen inclinómetros de fibra óptica, acelerómetros, estaciones climatológicas y GPS (Bacuilima y Barbecho, 2022b). De acuerdo con los autores, el sistema está segmentado en siete subsistemas que abarcan desde la adquisición y transmisión de los datos hasta la evaluación de la salud estructural ejecutada de forma automática en tiempo real; de igual modo, cuenta con la capacidad de monitorear tormentas, como lo registró durante el evento del tifón Nida.

La precisión del SHM está estrechamente relacionada con el adecuado procesamiento de las señales. De acuerdo con Cruz Gervacio (2023), el Centro Cultural Universitario Tlatelolco es una edificación que ha sido monitoreada en el transcurso de diez años. Para tal fin, se empleó el siguiente proceso matemático, lo cual incluye:

- **ICEEMDAN (descomposición empírica en modos):** utilizada para descomponer las señales capturadas por GPS en subcomponentes referentes al desplazamiento del

edificio denominados Funciones de Modo Intrínseco (Intrinsic Mode Functions o IMF por sus siglas en inglés).

- **Análisis de fluctuación sin tendencia (DFA-1):** aplicado a cada IMF con el objetivo de calcular el exponente de *Hurst*, lo que permite distinguir qué componentes de la señal son ruido persistente y cuáles contienen el movimiento dinámico propio de la estructura en análisis.
- **Transformada de Wavelet:** empleada para atenuar el ruido blanco (de alta frecuencia) en el primer componente de la descomposición.
- **Algoritmo MUSIC, Lomb-Scargle y Welch:** estos tres métodos son aplicados después de procesar la señal para determinar la Densidad Espectral de Potencia (Power Spectral Density o PSD por sus siglas en inglés) e identificar la frecuencia natural del edificio, con un resultado de 0.54 Hz.

En la determinación de las propiedades dinámicas estructurales mediante la aplicación de EMA existen múltiples investigaciones. Ejemplo de ello es el caso de un modelo de pórtico a escala de polipropileno y acero estructural ASTM A-36 de múltiples grados de libertad (Varanis et al., 2018). En este se estudia el análisis de vibraciones mecánicas en un edificio a cortante con la finalidad de determinar las frecuencias naturales, tanto en vibraciones libres como forzadas. Este tipo de metodología (EMA) se empleó igualmente en el puente Hell Bridge Test Arena en Noruega, donde por medio de un agitador de vibración modal (el cual cuenta con la capacidad de generar vibraciones verticales en la estructura) se lograron obtener las

características sensibles a afectaciones sujetas a las respuestas estructurales capturadas por 58 acelerómetros (Cruz Gervacio, 2023).

Verificar el funcionamiento del sistema de monitoreo estructural es primordial antes de aplicarlo a una estructura edificada. Por lo tanto, de acuerdo con Hasani et al. (2024), para tener certeza del correcto funcionamiento de las herramientas electrónicas, se ejecuta un análisis experimental en entornos controlados (como laboratorios) a través de modelos a escala. De acuerdo con dicho autor, esto se convierte en una práctica estándar antes de su aplicación en edificaciones de gran envergadura; es el caso de una estructura tipo pórtico de aluminio, la cual presenta cuatro pisos y es estimulada sobre una mesa vibratoria. Igualmente, en el estudio de Rocha et al. (2023), se validó el funcionamiento de un sistema inalámbrico compuesto por módulos MPU-6050 con tecnología Arduino, implementado en una losa de concreto a escala (6.1 m x 4.1 m). En el estudio mencionado, el resultado compara el rendimiento del sistema MEMS frente a un sistema de gama superior en la determinación de las propiedades dinámicas del modelo, tales como la frecuencia natural y las formas modales.

Sin embargo, debido a los elevados costos en la implementación de los sistemas anteriormente citados, existe la necesidad de acceder a soluciones económicamente viables. De acuerdo con Hasani et al. (2024), los sensores MEMS de bajo costo son una alternativa para aplicar SHM en estructuras civiles edificadas. Se destaca el caso del puente Lamberti en hormigón armado, ubicado en la provincia de Parma, Italia; construido en el año 1933, distinción que le otorga ser una estructura con alto valor histórico y patrimonial. La estructura dispone de tres tramos de 38 metros y tres arcos entrelazados que se conectan directamente al

tablero, el cual está conformado por vigas perpendiculares que soportan la losa de hormigón de 50 centímetros de espesor. Adicionalmente, la estructura de arcos está conectada entre sí por medio de vigas transversales dispuestas debajo del nivel del tablero para asegurar rigidez. En esta edificación, para el análisis, se instalaron 30 nodos sensores inalámbricos, lo cual favorece a una captura de datos detallada; estos fueron resguardados en cajas protectoras ante posibles inclemencias climáticas. Se implementó una unidad de enlace (*gateway*) en la parte central del puente sin exceder los 60 metros de distancia; esto asegura una comunicación constante sin perder operatividad en el sistema por desconexión de los sensores, en consecuencia, se evitan posibles fallos en la transmisión de datos. El soporte energético es suministrado con un panel solar de 25W y los datos fueron subidos desde los sensores al *gateway* por medio de Wi-Fi a un servidor en la nube por conexión 4G LTE. Se realizaron muestreos diarios entre 30 y 120 minutos con frecuencias de muestreo seleccionables de 62.5, 125 o 250 Hz, orientados al análisis del puente en condiciones diversas de temperatura y tráfico.

Con respecto a los sistemas de monitoreo inalámbrico, estos ofrecen una ventaja significativa en la factibilidad de la instalación, adaptabilidad en la disposición de los sensores y ahorro en los gastos globales (Hasani et al., 2024). De acuerdo con los autores, la placa de desarrollo ESP32 cuenta con la capacidad de operar inalámbricamente a un alto rendimiento de datos, simplicidad de red y una cobertura que puede abarcar hasta 200 metros en exteriores. Uno de los inconvenientes en la aplicación de métodos convencionales es la gran longitud del cableado analógico, el cual pierde calidad en ambientes densos y abre la posibilidad de captar

ruido electromagnético originado por redes eléctricas o dispositivos electrónicos (Toscani et al., 2022a). Este tipo de sistemas que implementan cableado puede requerir de conductos especializados para su protección, lo que se refleja en un elevado costo de implementación y una ampliación en los plazos de instalación (Bono et al., 2025). Esto deriva en la importancia de desarrollar un sistema remoto, basado en la placa de desarrollo ESP32 (protocolos Wi-Fi), capaz de procesar datos adecuadamente; en consecuencia, mejora el flujo de los datos y garantiza la compatibilidad con procesos fundamentados en la nube (Rocha et al., 2023).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se presenta la siguiente tabla de errores calculados en algunos estudios experimentales que indican porcentajes de errores comunes en la determinación de las propiedades dinámicas de estructuras.

Tabla 1

Rangos de discrepancia en la determinación de las propiedades dinámicas

Caso de estudio	Error en frecuencia (<i>f</i>)	Error en las formas modales (MAC)	Observaciones	Fuente
Pórtico a escala (4 pisos)	2.01%–6.07%	MAC ≈ 1	FEM vs SSI (OMA)	(Hasani et al., 2024)

Sensores high grade – low cost	<6%	N/A	Sistemas profesionales vs económicos	(Rocha Ribeiro et al., 2023)
Edificio EMP vs Modelo SAP2000	13.3%	N/A	Rigidez no capturada por el modelo	(Restrepo & Jaramillo, 2008)
Pórticos y edificios	N/A	>10%	Error en los elementos individuales	(Vélez et al., 2009b)
Comparación de sensores (IEPE vs piezoeléctricos)	0.004%–11%	N/A	El error es mayor en frecuencias bajas	(Trujillo et al., 2021)
Estructura a escala diseñada a cortante	1.98%–6.07%	N/A	FEM vs (FDD/SSI)	(Hasani et al., 2024)
Edificio real (3 pisos)	N/A	22%–34%	Error para los modos fundamentales	(Guerrero, 2024)

Nota. Porcentajes de error identificados de las propiedades dinámicas proporcionados por diversos trabajos de investigación.

Tabla 2

Valores referenciales de propiedades dinámicas determinados en diversos estudios

Caso de estudio	Modo	Frecuencias Naturales (f_n)	Razón de amortiguamiento (ζ)	Fuente
	1	2.03 Hz	1.08 %	
Pórtico a escala (4 pisos), tipo cortante	2	6.15 Hz	0.28 %	(Hasani et al., 2024)
	3	9.81 Hz	0.35 %	
	4	12.15 Hz	0.53 %	
	1	4.02 Hz	3.66 %	
Edificio (U.E Sarmiento)	2	4.62 Hz	1.51 %	(López, 2005)
	3	4.89 Hz	1.17 %	
	1	6.129 Hz	0.35 %	(Charca Morocco, 2024)
Pórtico metálico de 3 niveles a escala	2	18.604Hz	0.55 %	
	3	28.649Hz	0.12 %	
	1	1.65 Hz	0.55 %	(Andrade & Berni, 2021)
Pórtico metálico de 3 niveles a escala en mesa vibratoria	2	5.01 Hz	0.49 %	
	3	7.61Hz	0.85 %	

Nota. Frecuencias naturales y razones de amortiguamiento proporcionados por diversos trabajos de investigación.

5.3. Marco Conceptual

5.3.1. Monitoreo de Salud Estructural (SHM)

El SHM es definido como el monitoreo permanente o rutinario de determinados parámetros los cuales evidencian el estado y el rendimiento de una edificación (Garita, 2016). Según este autor, este proceso tiene el objetivo de planear una ruta de mantenimiento, reforzar la seguridad y conocer la estructura en general. Del mismo modo, el propósito se centra en evaluar las condiciones actuales de la estructura al determinar, localizar, evaluar y cuantificar posibles afectaciones, lo cual permite anticipar su vida útil (Quintero y Villamizar, 2010).

Para lograr los objetivos que tiene el SHM, la aplicación de SAD con acelerómetros MEMS incorporados es fundamental y vanguardista en la recolección de datos del comportamiento estructural. Por lo tanto, el uso de este tipo de sensores permite facilitar el logro de los objetivos del SHM como la medición de la aceleración o desplazamiento (Toscani et al., 2022b). Según este autor, en la identificación de daños, la determinación de la frecuencia natural y de las formas modales, es fundamental ejecutar muestreos sincronizados, que requieren de equipos costosos y un extenso cableado.

5.3.2. Sistema de Múltiples Grados de Libertad (MDOF)

En dinámica estructural, los sistemas de Múltiples Grados de Libertad (Multi-Degree-of-Freedom o MDOF por sus siglas en inglés) son modelos estructurales que precisan más de una coordenada para expresar completamente el movimiento de todas las masas de una estructura, independiente del tiempo (Chopra, 2012).

Este tipo de sistemas son descritos mediante una ecuación de movimiento que incluye el amortiguamiento y se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (1)$$

donde m es matriz de masa que comprende las propiedades de masa de la estructura; c es la matriz de amortiguamiento que representa la disipación de energía del sistema; k matriz de rigidez referente a la resistencia de la deformación a la estructura; $\ddot{u}$ vector de aceleración; $\dot{u}$ vector de velocidad y u vector de desplazamiento.

5.3.3. Análisis Modal y Propiedades Dinámicas

El análisis modal es un procedimiento técnico por el cual es posible caracterizar una estructura con respecto a la frecuencia, el amortiguamiento y los modos de vibración, valores que determinan las propiedades dinámicas de un sistema específico (Avitabile, 2000). Dichas propiedades configuran una descripción integral de las características dinámicas inherentes de la estructura (Døssing, 1988). Adicionalmente, según Rainieri y Fabbrocino (2014), estas se definen como los parámetros que gobiernan la respuesta de la estructura ante vibraciones forzadas o en condiciones de servicio.

5.3.4. Frecuencia Natural (f_n)

De acuerdo con Lashin et al. (2020), la frecuencia natural es la frecuencia de un sistema estructural en la cual es propenso a vibrar en ausencia de fuerzas externas o de amortiguamiento. Esta es un atributo propio de los materiales y las estructuras, que presentan

una tendencia de oscilación en esta clase de frecuencias; por lo tanto, manifiestan un comportamiento de movimiento denominado como modo normal. Según los autores, la respuesta vibratoria de toda estructura está en función de su masa y su rigidez.

Matemáticamente se expresa mediante la frecuencia angular (ω_n) y la frecuencia natural (f_n):

- **Frecuencia angular (ω_n):**

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2)$$

donde K es la rigidez de la estructura y M es la masa de la estructura.

- **Frecuencia natural (f_n):**

$$f_n = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3)$$

5.3.5. Razón de Amortiguamiento

Para entender correctamente el concepto de razón de amortiguamiento, es importante conocer primero su definición, la cual es un parámetro constitutivo de los materiales para resistir al movimiento, donde la vibración es disipada a causa del rozamiento, fuerzas de fricción producidas internamente y la viscosidad que presente el material (Cortés, 2012). Adicionalmente, según Alipour y Zareian (2008), es la facultad de la estructura de disipar una determinada cantidad de energía en un periodo oscilatorio respecto al máximo valor de energía que se acumula en la estructura. Finalmente, Ruiz y Orellana (2021) indican que es la capacidad de disipar energía sísmica; además, se recalca la diferencia entre el amortiguamiento intrínseco

y la capacidad de disipación mediante el desempeño inelástico de los elementos estructurales.

Esta propiedad es cuantificada a través del coeficiente de amortiguamiento viscoso (c). La razón de amortiguamiento(ζ) es una fracción del amortiguamiento crítico en el sistema y posee una medida adimensional, la cual depende de su masa (m), su rigidez(k) y del coeficiente (m) (Chopra, 2012).

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2 * m * \omega_n} \quad (4)$$

donde c es el coeficiente de amortiguamiento, c_{cr} es el amortiguamiento crítico y ω_n es la frecuencia natural angular del sistema.

5.3.6. Formas Modales

Las formas modales son patrones de deformaciones o vibraciones particulares que asume un sistema estructural cuando oscila en una específica frecuencia natural; por lo tanto, describen la configuración geométrica en su estado deformado que adopta la estructura de forma natural (Sánchez Villegas, 2024). De acuerdo con Chopra (2012), en un modo natural de vibración, los grados de libertad de la estructura se desplazan en la misma fase, lo que quiere decir que todos transitan por sus posiciones de equilibrio (cero), máximas y mínimas simultáneamente.

Matemáticamente, las formas modales están representadas por vectores característicos (*eigenvectors*), que son calculados al solucionar las ecuaciones de movimiento del sistema (problemas de valores propios), las cuales determinan el desplazamiento relativo de elementos de la estructura entre sí (Wilde, 2008).

5.3.7. Edificio a Cortante

De acuerdo con Chopra (2012), un edificio a cortante es una simplificación idealizada para facilitar el estudio de la dinámica estructural. En este tipo de estructuras, no existe la rotación de las secciones horizontales (pisos) con referencia a sus ejes; por lo tanto, se concentra en los niveles una serie de masas, las cuales están acopladas por elementos elásticos (columnas), las cuales proporcionan rigidez lateral. Bajo este enfoque, las deformaciones suceden a causa del desplazamiento lateral relativo entre niveles sucesivos, de forma análoga al comportamiento de una viga a cortante que tiene deslizamientos en sus capas.

Para realizar la modelación de una edificación con este comportamiento se debe respetar el cumplimiento de las siguientes hipótesis:

- Los sistemas de piso presentan una rigidez a flexión infinita ($E_{ib} = \infty$) ante las columnas; por lo tanto, se restringe cualquier rotación en los nodos de la edificación.
- Rigidez axial infinita, donde se desprecia la extensibilidad de las columnas y vigas.
- Masa de la edificación concentrada en los niveles de piso.
- El desplazamiento traslacional horizontal se considera como el único grado de libertad por piso en la dirección bajo análisis.

5.3.8. Rigidez en Conexiones Soldadas

El modelo de pórtico para el análisis es resultado de la unión de varias platinas metálicas, y para asegurar que dichas uniones se comporten adecuadamente es necesario garantizar la transmisión correcta de esfuerzos entre los componentes. Para lograrlo, se soldaron los elementos entre sí, procedimiento que se define como la integración conjunta entre piezas metálicas a través del calentamiento del metal hasta alcanzar el estado líquido, de tal manera que al solidificarse actúen como una sola pieza continua. Adicionalmente, este tipo de uniones puede alcanzar resistencias superiores al metal base (platinas) con el que se trabaja (Chazaro Rosario, 2019; Numan, 2023).

Las uniones soldadas garantizan una mayor continuidad y capacidad portante que las conexiones atornilladas, las cuales son ideales para estructuras que necesiten de una rigidez superior (Caicedo Chiriboga, 2023). Para su correcto funcionamiento es adecuado unir toda la sección del elemento al otro elemento, lo que garantiza una correcta transmisión de momentos flectores, cortantes y axiales (Caicedo Chiriboga, 2023). Para la construcción del modelo, se implementó soldadura de filete, empleada en más del 80% de los casos, y cuyo proceso debe garantizar un ángulo comprendido entre las caras de los miembros de 60° y 120° (Iglesias, 2021; Ministerio de Transportes, 2021)

5.3.9. Análisis Modal Experimental (EMA)

Según Allemang y Brown (2002), el EMA es la fase para estimar las propiedades dinámicas de un sistema lineal y constante en el tiempo. Este procedimiento se utiliza,

primordialmente, para comprender problemas dinámicos de vibración cuya respuesta no se encuentra a través de intuición o modelos analíticos. Por lo tanto, para registrar estas mediciones, el pórtico en estudio se debe excitar de manera artificial; para este caso en particular, se emplea un martillo de goma para generar un impacto en la parte más alta de la estructura. Conforme a los mismos autores, el registro del impacto se define como una excitación determinista transitoria, la cual se genera al administrar un pulso de entrada, en una pequeña fracción de tiempo.

5.3.10. Sistemas Microelectromecánicos (MEMS)

Los MEMS se definen como mecanismos que incorporan componentes mecánicos y eléctricos a escala reducida (alrededor de 1 μm hasta 1 mm), donde el silicio es el material predominante gracias a su buen comportamiento, a causa de su elevado punto de fusión, además de una baja dilatación térmica y alta dureza (superior a la de la mayoría de los metales); por lo tanto, cuando estos se incorporan y emplean como sensores, su operatividad se fundamenta en la capacidad de medir e identificar variaciones en variables físicas (como vibraciones de elementos estructurales) y transformarlas en señales eléctricas (Tecpoyotl Torres et al., 2023).

En la aplicación de un sistema de monitoreo estructural, estos mecanismos se integran en su funcionamiento y, adicionalmente, se categorizan como acelerómetros MEMS digitales, definidos como nodos de adquisición digital (Toscani et al., 2022a). De acuerdo con Ietka et al. (2023), estos dispositivos que conforman sistemas de medición son atractivos para la aplicación

en proyectos de salud estructural, debido a su bajo costo en el mercado, facultad inalámbrica, autonomía y muy reducidas dimensiones; propiedades que componen una nueva generación vanguardista de dispositivos de medición de vibraciones. El diseño simple e intrínseco de estas herramientas las convierte en opciones idóneas para ejecutar un monitoreo preciso de la salud estructural en edificaciones (Bedon et al., 2018).

5.3.11. Acelerómetros Triaxiales

Un acelerómetro es un instrumento electromecánico con la capacidad de determinar fuerzas de aceleración durante su funcionamiento activo, mediante el uso de gravedad (g) como unidad primordial (Montes Fonseca, 2019). Internamente, este dispositivo instalado dentro de una carcasa sellada y hermética (en referencia a su variante MEMS) configura un sistema que presenta una masa de prueba en suspensión, sostenida por componentes que funcionan como vigas de resorte. Este mecanismo tiene la capacidad de determinar la aceleración en tres ejes; en el instante en que se genera una aceleración en el eje sensible, se produce una fuerza inercial que defleca dicha masa, cuya ubicación se detecta de forma capacitiva. Este movimiento mecánico transforma esa variación entre las placas en una señal de tensión (voltaje) correspondiente a la aceleración (Nessler et al., 2024). En un contexto de ingeniería civil, el funcionamiento de dicho dispositivo se emplea en la monitorización de estructuras, dado que cuenta con la capacidad de detectar vibraciones de los elementos estructurales en tiempo real (Klingensmith et al., 2014).

5.3.12. Microcontrolador ESP32

De acuerdo con Maier et al. (2017), un microcontrolador estándar se define como el cerebro del sistema de monitoreo; además, es un elemento esencial del Internet de las Cosas (IoT), el cual incorpora un procesador y un módulo de comunicación inalámbrica (Wi-Fi), o el acoplamiento de ambos en un solo componente. En referencia al ESP32, el autor lo define como un microcontrolador de bajo consumo tipo *System on a Chip* (SoC); además, cuenta con la capacidad de operar vía Wi-Fi y Bluetooth. Adicionalmente, este dispositivo está potenciado por un microprocesador de doble núcleo Tensilica Xtensa LX6, el cual integra memorias (ROM, SRAM) y periféricos como Convertidores de Analógico-Digital (ADCs) de 12 bits, Convertidores de Digital-Analógico (DACs) de 8 bits y sensores táctiles capacitivos. Dicho microcontrolador administra la conectividad por medio del Wi-Fi, y gestiona los datos capturados por el sensor a través de protocolos de comunicación digitales (Vyas et al., 2025).

5.3.13. Protocolo de Comunicación I2C

El protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*) es una interfaz serial (o comunicación en serie) con la facultad de generar comunicación a velocidades bajas o medias entre circuitos integrados con periféricos incorporados que realizan tareas específicas, situados en una misma placa (Kamble y Pardeshi, 2018). De acuerdo con Kumar et al. (2025), la operatividad del I2C posibilita una eficiente comunicación entre dispositivos tales como microcontroladores y sensores. Su implementación en proyectos, entre los que se integra el monitoreo estructural es apropiada por la simplicidad de su conexión, ya que posibilita la integración de múltiples

dispositivos bajo el mismo bus de comunicación. Esto lo ejecuta únicamente a través de la línea de datos (Serial Data o SDA, por sus siglas en inglés) para el intercambio de datos, mientras que la línea de reloj (Serial Clock o SCL, por sus siglas en inglés) se encarga de sincronizar la comunicación.

5.3.14. Teorema de Nyquist-Shannon

El teorema de Nyquist-Shannon, según Escobar (2008), estipula que una señal analógica continua, con un rango de frecuencias definido, puede ser reconstruida con base en sus muestras, si la tasa de muestreo es mayor al doble de la frecuencia más alta registrada de la estructura, valor denominado como la frecuencia de Nyquist (f_N). Desde la perspectiva del autor, esto asegura que los datos de la señal original estén comprendidos en el conjunto de muestras, siempre que el criterio sea respetado.

5.3.15. Efecto Aliasing

De acuerdo con Cortés et al. (2008), el efecto *aliasing*, consecuencia de no cumplir con el teorema de Nyquist-Shannon, se define como un fenómeno que convierte en indistinguibles las señales continuas de distintas frecuencias al ser muestreadas de manera digital. Por lo tanto, a partir de los datos digitales la señal original no puede ser reconstruida de forma precisa; motivo por el cual la aplicación estratégica de filtros es fundamental para disminuir sus efectos.

Dicho proceso está relacionado con las frecuencias falsas generadas debido a un muestreo deficiente; por consiguiente, para mitigar este fenómeno, se aplica la siguiente fórmula matemática:

$$f_s \geq 2 * f_{max} = 1/\Delta t \quad (5)$$

donde f_s representa la frecuencia de muestreo y f_{max} corresponde a la frecuencia máxima registrada.

5.3.16. Detrending

El *detrending* es un proceso que consiste en eliminar componentes frecuenciales del muestreo cercanos al valor de cero (Ramos Domínguez, 2025b). La finalidad de dicho proceso es suprimir datos modales que puedan verse distorsionados por señales de baja frecuencia, que no conforman la respuesta dinámica de la estructura bajo análisis (Ramos Domínguez, 2025b; Wu et al., 2007). Según Lajevardi (2012), dichos componentes oscilan dentro de una tendencia cercana a cero denominada *DC offset*, la cual se categoriza como la respuesta del sensor cuando no se registra una señal de entrada. De acuerdo con el mismo autor, los sensores suministran valores a pesar de no existir movimiento; en un caso idealizado, la señal de salida debería ser igual a cero. Si la señal del sensor registrada no es filtrada, provocará en esta un comportamiento de una aceleración constante falsa, lo cual puede distorsionar los modos fundamentales de vibración identificados, a causa de ruidos ambientales durante el desarrollo experimental (Ramos Domínguez, 2025b).

5.3.17. Filtrado Digital Butterworth

De acuerdo con Cortés et al. (2008), el filtrado digital de Butterworth es un proceso que garantiza que las frecuencias capturadas por los sensores sean transmitidas uniformemente durante el monitoreo digital, sin cortar abruptamente el ruido de transición para generar una banda de paso fidedigna y sin distorsiones de amplitud. A partir de esta premisa, el autor asegura que el valor de las amplitudes de las frecuencias naturales del modelo no se distorsiona y se ubica dentro del rango deseado, lo cual representa fielmente la magnitud del movimiento. Por lo tanto, en el análisis del comportamiento estructural, dicho proceso se emplea para el procesamiento digital de señales, fundamentalmente en la reducción y atenuación del ruido de fondo propio de los sensores o producido, posiblemente, debido a su disposición en entornos urbanos con elevado ruido ambiental, el cual alteran las señales que representan la vibración estructural.

5.3.18. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform o FFT, por sus siglas en inglés), según Spilsbury y Euceda (2016), es un procedimiento de factorización matricial definido como un método eficaz que computa la Transformada Discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform o DFT, por sus siglas en inglés). De esta manera, se ahorra cálculos numéricos, para optimizar su procesamiento a través de técnicas algebraicas (Duoandikoetxea, 2003).

En el análisis dinámico estructural, el algoritmo FFT resuelve las fórmulas del par de ecuaciones de la DFT cuando los movimientos de la estructura son descritos de manera numérica, sin un consumo excesivo de recursos computacionales (Chopra, 2012).

5.3.19. Método de Welch

La determinación dinámica de la estructura está sustentada en el método de Welch (1967). Este es un procedimiento primordial en el procesamiento digital de señales, el cual facilita la transformación de las aceleraciones capturadas por los sensores del dominio del tiempo al de frecuencia de forma robusta. A continuación, en este apartado, se detallan los procesos incluidos para obtener una PSD estadísticamente sólida, la cual resulta fundamental para identificar de manera precisa el comportamiento dinámico de la estructura.

5.3.19.1. Segmentación de la Señal. De acuerdo con Welch (1967), este proceso se utiliza para dividir una serie única de registros de longitud N en múltiples partes manejables de menor tamaño. Welch define que si se tiene una muestra $X(j)$ para $j = 0, \dots, N - 1$, esta puede ser descompuesta en K segmentos con una longitud L .

$$K = \frac{N - L}{D} + 1 \quad (6)$$

donde N es el número total de capturas (en este caso, obtenidas por el sensor MPU-6050), L es la longitud de cada segmento, D es la distancia entre el punto inicial de un segmento y el siguiente.

- Si $D = L$, los segmentos se disponen uno tras otro sin solaparse.

- Si $D = L/2$, existe un solapamiento (*overlap*) del 50 %.

La segmentación de la señal se cataloga primordial debido a tres necesidades principales:

- **Reducción de la varianza:** el “ruido” aleatorio se reduce sustancialmente mediante el promedio los resultados de los segmentos, lo cual evita analizar un extenso y único resultado. Esto proporciona una mayor claridad en los picos reales de frecuencia de la estructura en análisis.
- **Gestión de la memoria:** la transformación de secuencias cortas (L) presenta una mayor eficiencia para equipos con un almacenamiento limitado, lo que optimiza el empleo de la memoria para el procesamiento.
- **Análisis de no-estacionariedad:** si se divide la señal, resulta probable observar con detalle cambios en las propiedades de la estructura, atribuidos a posibles deterioros o afectaciones durante el monitoreo.

5.3.19.2. Solapamiento (*overlap*). Welch (1967) instaure que la ubicación de inicio de cada segmento se determina por la variable de desplazamiento D . El porcentaje de solapamiento es definido por la relación entre D y la longitud de la fracción L , lo cual determina la separación de los puntos de inicio de las secuencias consecutivas de la señal registrada; por lo tanto:

- Si $D = L$, los segmentos se disponen uno tras otro sin solaparse.

- Si $D < L$, se produce el solapamiento, el cual asigna un fragmento de la señal en más de un segmento. Por ejemplo, si $D = L/2$, existe un solapamiento (*overlap*) del 50 %.

A través de este método se busca contrarrestar los efectos negativos que presenta el ventaneo, el cual disminuye la amplitud de la señal en los extremos de los segmentos. Con la finalidad de evitar errores en la resolución de frecuencia, este procedimiento se aplica para evitar que los registros que se disponen en los bordes queden marginados. Dichos registros, por solapamiento, se ubicarán en el centro del bloque siguiente para ser analizados a máxima amplitud, lo cual garantiza la consistencia de todo el registro.

Este proceso aumenta de manera artificial la cantidad de segmentos (K) en un mismo registro de longitud (M). A pesar de generar dependencia entre segmentos, esto se compensa mediante el promedio de más periodogramas, lo cual genera una densidad espectral más estable con una optimización notable en la varianza. En última instancia, los periodogramas son fundamentales en la transformación de señales del dominio del tiempo al dominio de frecuencia.

5.3.19.3. Ventaneo (*windowing*). Previamente a la transformación al dominio de la frecuencia, es fundamental aplicar el proceso de ventaneo (*windowing*), el cual se constituye como el procedimiento donde cada parte de la señal registrada es multiplicada por una función matemática denominada ventana, $W(j)$. Según Welch (1967), con la aplicación de este

procedimiento se origina el concepto de periodograma modificado, lo que posibilita desmarcarse del análisis espectral tradicional.

Este proceso es primordial debido a dos fundamentos técnicos:

- **Reducción de fugas espectrales (*spectral leakage*):** las discontinuidades que se generan en los extremos de los segmentos en la toma de las señales introducen frecuencias falsas que enmascaran el espectro. El empleo de la función ventana atenúa los valores presentes en los bordes gradualmente a cero. De esta manera, se reducen las distorsiones, con la finalidad de identificar de forma precisa las frecuencias naturales de la estructura analizada.
- **Estimación de factor de normalización (U):** como se mencionó anteriormente, la aplicación de la función ventana disminuye la amplitud de la señal en los extremos, lo que genera igualmente una pérdida de energía. Por eso, Welch (1967) incorpora una constante de normalización (U), con el fin de calcular correctamente la potencia, tal variable se define de la siguiente manera:

$$U = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} W^2(j) \quad (7)$$

donde L corresponde al número de muestras por segmento, j representa el índice de tiempo discreto (o contador de muestras), $W(j)$ se identifica como la función de ventana aplicada que representa el valor de la ventana en la muestra j y $W^2(j)$ es el cuadrado de la amplitud de la ventana en cada punto.

5.3.19.4. Periodograma Modificado. Este concepto se refiere al cálculo del espectro de potencia aplicado a un segmento de datos previamente modificados por el proceso de ventana. Se implementa con la finalidad de ajustar errores estadísticos del periodograma estándar al trabajar con registros finitos de tiempo. Mediante este proceso, al modificar la señal antes de aplicar la transformada de Fourier, se disminuye la fuga espectral (*spectral leakage*), lo que da como resultado picos de frecuencia más nítidos y una reducción en la interferencia entre componentes espectrales adyacentes.

En cada segmento de datos k , se establece el periodograma modificado $I_k(f_n)$, como el cuadrado del módulo de la transformada de Fourier de la serie ventaneada, ponderado con un factor de normalización, el cual matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$I_k(f_n) = \frac{L}{U} |A_k(n)|^2 \quad (8)$$

donde $A_k(n)$ es la FFT del segmento siguiente al producto con la ventana $W(j)$, L se define como número de muestras del segmento y U como la constante de normalización de la energía de la ventana.

La implementación de ventana deriva en la reducción de la potencia total de la señal inicial; por lo tanto, el periodograma se divide por el factor U . Esto asegura que la densidad espectral no tenga sesgos y muestre la verdadera magnitud de las vibraciones, lo cual es vital para determinar las frecuencias naturales en estructuras civiles.

5.3.19.5. Promediado espectral (averaging). En esta fase se lleva a cabo la media aritmética de los periodogramas modificados que se obtienen de cada segmento. Esto es

fundamental en la consecución de una estimación de la densidad espectral de potencia para que sea estadísticamente estable. Al obtener K periodogramas modificados, representados como $I_k(f_n)$, el cálculo final de la densidad espectral $\hat{P}(f_n)$ se determina así:

$$\hat{P}(f_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K I_k(f_n) \quad (9)$$

El resultado es un espectro estabilizado que muestra el comportamiento global de la señal, el cual se calcula de manera independiente para cada frecuencia f_n . Aplicar este proceso reduce la varianza del error, lo que permite que se atenúe el ruido aleatorio y se destaquen las frecuencias naturales de la estructura en análisis.

Dentro de la monitorización estructural, el promediado asegura que los picos identificados en la PSD sean las frecuencias naturales del sistema y no interferencias temporales. Este proceso consiste en renunciar a una reducida parte de la resolución frecuencial para adquirir estabilidad, la cual permite contrastar registros en diferentes momentos de tiempo con precisión.

5.3.19.6. Densidad Espectral de Potencia (PSD). La PSD muestra la distribución de la potencia de una señal que está en función de la frecuencia, lo cual permite determinar los principales elementos que predominan en un registro temporal. Esta se calcula mediante el promedio de los periodogramas modificados de cada segmento, lo que garantiza que el espectro $\hat{P}(f_n)$ sea una representación atenuada (baja varianza) y estadísticamente estable de la señal inicial.

En el contexto de la ingeniería civil, la PSD es empleada como una herramienta sustancial para el EMA. La gráfica PSD obtenida muestra lo siguiente:

- **Frecuencias naturales:** picos observables de mayor magnitud que caracterizan las frecuencias de resonancia de la estructura.
- **Contenido energético:** el área bajo la curva PSD indica la potencia de la señal en su totalidad, con lo cual se cuantifica la intensidad de las vibraciones en determinados rangos.

La PSD obtenida por el método de Welch disminuye la varianza del error; esto suministra una curva precisa y fácilmente identificable, lo que agiliza la toma de decisiones sobre el estado de salud estructural de la estructura en estudio.

5.3.19.7. Resolución de frecuencia (Δf). La resolución de frecuencia define la capacidad del método de Welch para discernir componentes espectrales adyacentes; además, es un parámetro que está inherentemente asociado al número de muestras del segmento analizado (L), y se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta f = \frac{f_s}{L} \quad (10)$$

donde f_s es la frecuencia de muestreo y L es el número de muestras por segmento.

En la práctica, se debe formular un compromiso estadístico (*trade-off*); esto implica que, al incrementar la cantidad de segmentos con la finalidad de reducir la varianza, se disminuye L , lo que deriva en una resolución más gruesa. En el proceso de SHM, seleccionar L es

fundamental para equilibrar la estabilidad que presenta el espectro, lo cual antepone la precisión en la identificación de picos resonantes próximos y garantiza que la discretización de la PSD no enmascare las propiedades dinámicas reales de la estructura.

5.3.20. Densidad Espectral Cruzada (CSD)

La Densidad Espectral Cruzada (Cross-Spectral Density o CSD, por sus siglas en inglés), es definida como una función matemática en el dominio de la frecuencia que cuantifica la similitud o independencia entre dos señales a lo largo de todo el espectro de frecuencias (Herrera Muñoz, 2018; White, 2010).

Dentro de la investigación de este documento, enfocado a la dinámica estructural, es fundamental calcular la CSD ya que, con base en los registros capturados por los acelerómetros, esta determina frecuencias comunes y el ángulo de fase de las aceleraciones capturadas entre los sensores dispuestos en diferentes niveles del pórtico (Domínguez et al., 2005). Por consiguiente, la CSD puede determinar el modo estructural real, lo cual verifica que dos registros independientes tienen una frecuencia común y su ángulo de fase es 0° o 180° (0 o π radianes).

5.3.21. Función de Transmisibilidad Espectral Relativa Basada en CSD

La Función de Transmisibilidad Espectral Relativa es una herramienta en el dominio de la frecuencia que determina el desempeño entre dos señales (aceleraciones) registradas, relacionadas a distintos grados de libertad de una estructura (disposición de los sensores en los niveles) (Rodríguez Vivanco, 2017; Soto y Vente, 2021). De acuerdo con Rodríguez Vivanco

(2017), el método más avanzado y robusto para el procesamiento de los datos consiste en la CSD. Por ende, este método se calcula a través de la división de los espectros de densidad de potencia cruzados, mediante el uso de herramientas como el Método de Welch y funciones de ventaneo para moderar la fuga de espectros (leakage) y atenuar el ruido de los datos registrados.

En el contexto del presente trabajo, la transmisibilidad mide el desplazamiento lateral de cada nivel del pórtico en referencia al sensor maestro ubicado en el último nivel del pórtico (Soto y Vente, 2021). Estas funciones fundamentadas en el espectro de potencia convergen en un valor independiente del sensor maestro en la determinación de frecuencias naturales; por tal razón, son eficaces para identificar las formas modales de una estructura (Rodríguez Vivanco, 2017).

5.3.22. Método de Elementos Finitos (FEM)

De acuerdo con Vazquez y Lopez (2001), el método de Elementos Finitos (Finite Element Method o FEM, por sus siglas en inglés) determina cómo se comporta una estructura a través de una solución discontinua, la cual reemplaza una solución continua de las ecuaciones diferenciales. Por lo tanto, este método divide la estructura en elementos finitos, los cuales están unidos entre sí por medio de un determinado número de nodos. Esto significa que el grado de aproximación es directamente proporcional al incremento del número de divisiones realizadas en la estructura (densidad de la malla).

Esta es una herramienta que se utiliza en el análisis del comportamiento estructural, tanto en el análisis estático como dinámico, lo que permite crear modelos que presenten masa, amortiguamiento y rigidez con sentido físico, con la finalidad de obtener las propiedades modales (frecuencia natural, razón de amortiguamiento y formas modales) del sistema en evaluación (Vélez et al., 2009a).

5.3.23. Criterio de aseguramiento modal (MAC)

Para el análisis dinámico de estructuras, la comparación entre resultados numéricos y experimentales requiere la implementación de herramientas capaces de evaluar no solo la coincidencia de las frecuencias naturales, sino también su solicitud entre formas modales, bajo esta premisa surge el Modal Assurance Criterio (MAC – Criterio de aseguramiento modal), el cual se define como uno de los principales modelos para definir la correlación entre los vectores.

El MAC fue definido por Allemang y Brown (1982) como un coeficiente escalar, que mide el grado de dependencia lineal entre dos vectores, típicamente las formas modales, que son el resultado de la aplicación de diversas metodologías como elementos finitos y análisis experimental, su formulación se basa como el producto interno entre vectores y se define como:

$$MAC_{(i,j)} = \frac{|(\phi_i)^T(\psi_j)|^2}{((\phi_i)^T(\phi_i))((\psi_j)^T\psi_j)} \quad (11)$$

donde, ϕ_i y ψ_j representan los vectores modales correspondientes al modo i del modelo numérico y al modo j del modelo experimental respectivamente. Los valores obtenidos de esta metodología son acotados en el intervalo $[0\ 1]$, para lo cual un valor cercano a 1 indica correlación perfecta (vectores colineales) y a su vez un valor cercano a 0 indica independencia u ortogonalidad entre vectores. Una de las propiedades fundamentales del MAC es la invarianza frente al escalamiento y cambio de signo, y resulta relevante en la comparación entre resultados numéricos y experimentales, donde la fase o dirección inicial del movimiento puede diferir sin afectar la validez física del modo.

5.4. Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (Internet of Things o IoT, por sus siglas en inglés) se define como una red tecnológica asociada a la transformación digital y la interconexión inteligente de dispositivos cotidianos, tales como softwares, sensores, actuadores y sistemas electrónicos para que sean capaces de adquirir información del entorno, procesarla y transmitirla a través de internet de manera autónoma y en tiempo real (Atzori et al., 2010).

Como se establece en Atzori et al. (2010), el IoT permite captar variables físicas del entorno y transmitirlas en tiempo real hacia los nodos receptores centrales, además de incluir características como el bajo consumo energético, la capacidad de comunicación y la adquisición distribuida de la información, lo cual resulta bastante procedente en aplicaciones como el monitoreo estructural, en el que se demande la implementación de sistemas portátiles, de bajo costo y de fácil despliegue sobre estructuras reales o experimentales.

5.4.1. Internet de las Cosas (IoT) Aplicado a la Ingeniería

El Internet de las Cosas se define como una red de objetos físicos que incorporan sensores, software y otras tecnologías con el fin de conectar e intercambiar datos con otros dispositivos y sistemas a través de Internet o redes locales. Para el SHM, el IoT permite la transición de sistemas de adquisición “pasivos” (almacenamiento local) a sistemas “activos” y distribuidos, donde la información de vibración se transmite en tiempo real para su análisis inmediato (Atzori et al., 2010). En aplicaciones orientadas a la identificación modal, esta capacidad resulta especialmente relevante, ya que facilita la captura remota y simultánea de registros dinámicos en distintos puntos de la estructura, condición necesaria para comparar adecuadamente su respuesta vibratoria.

Bajo esta premisa, un aspecto crítico en sistemas IoT aplicados a la dinámica estructural es la sincronización temporal entre nodos, entendida como la capacidad de compartir una misma referencia de tiempo durante la adquisición de datos. Esta variable representa especial importancia en la identificación modal, debido a que parámetros como las formas modales dependen no solo de la amplitud de las señales, sino también de la relación temporal y de fase entre los diferentes puntos instrumentados de la estructura; por lo tanto, asegurar que las muestras registradas por los sensores correspondan al mismo instante de tiempo permite que el análisis modal experimental sea consistente y que la comparación entre niveles del pórtico represente de manera más fiel su comportamiento dinámico (Toscani et al., 2022b).

6. Desarrollo del Trabajo

6.1. Diseño, Construcción y Montaje del Modelo Experimental

El modelo empleado en el análisis experimental es un pórtico a escala que opera en un plano bidimensional. Este se estructuró conforme a la configuración de edificio de cortante con 3GDL; es decir, un grado de libertad por cada nivel.

6.1.1. Materiales

El material seleccionado para la construcción del modelo es acero A36, el cual cumple con los requerimientos ASTM A36. Este material conforma las platinas, que presentan un ancho de 1 1/2" y un espesor de 1/8". Dichos componentes configuran las columnas, vigas, losas y piezas de conexión que simulan los elementos estructurales del pórtico.

Las uniones entre los elementos se consolidan mediante pernos de 1/4-20 X 1" UNC de cabeza hexagonal, tuercas de 1/4" y arandelas planas de 5/16", con la finalidad de proporcionar uniones rígidas que emulan el funcionamiento de apoyos empotrados.

Tabla 3

Características geométricas de las platinas que componen el modelo

Componentes	Dimensiones Comerciales
Platinas	1 1/2" X 1/8"

Tabla 4*Características del material y los elementos que componen el modelo*

Elementos	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	E(kN/m ²)	Inercia(m ⁴)
Columnas	0.85	0.0390	0.003	2.0X10 ⁸	6.77e-11 m ⁴
Vigas/Losas	0.25	0.0780	0.006	2.0X10 ⁸	4.33e-09 m ⁴

6.1.2. Disposición Geométrica, Construcción y Ensamble.

El modelo se estructura como un pórtico con 3GDL. Este presenta tres niveles: el primero dispone de una altura de 35 cm, mientras que los dos pisos superiores cuentan con una altura de 25 cm. Los elementos de apoyo se componen de dos pares (columnas) de 85 cm de altura, los cuales están separados 25 cm entre sí por un elemento (viga/losa) de entrepiso. Estos últimos emulan un elemento rígido, debido a que están ensamblados por dos láminas superpuestas para evitar deformaciones, con la finalidad de simular fidedignamente el comportamiento de un edificio de cortante.

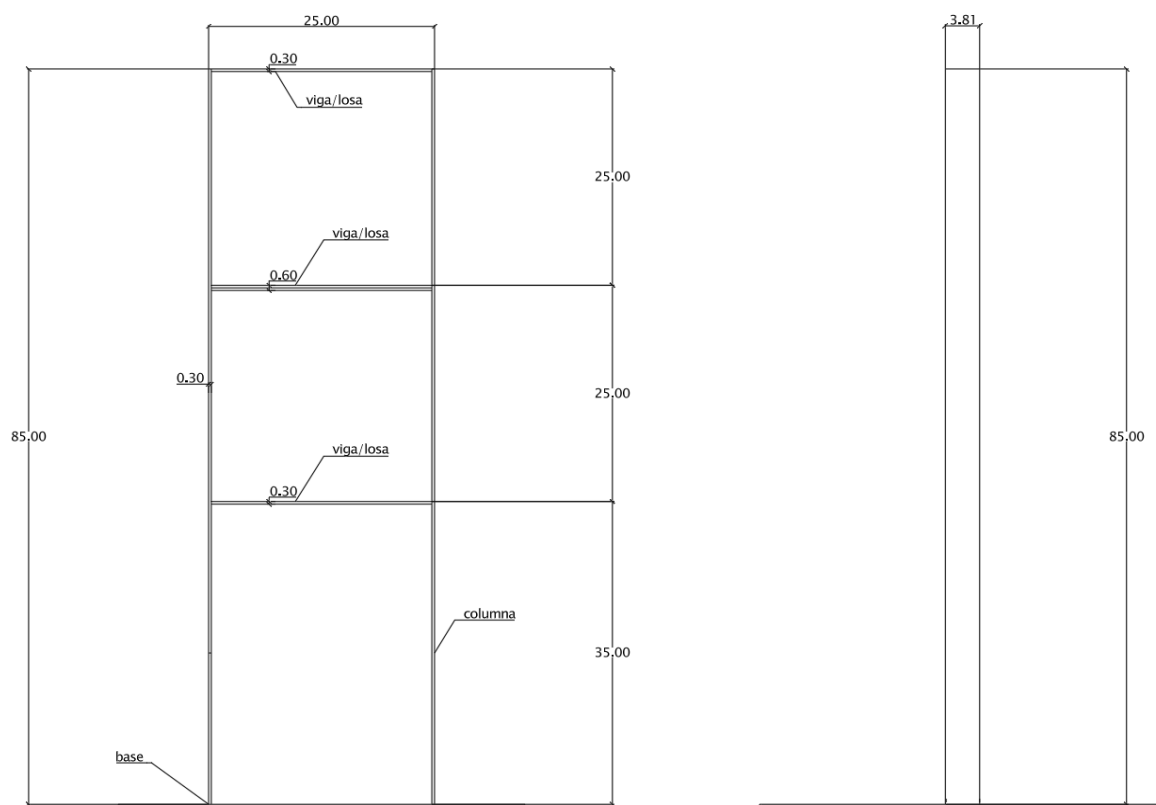
Tabla 5*Número de elementos que conforman del modelo*

Elementos	Descripción	Cantidad (Und)	Dimensiones
Columnas	Elementos verticales, soporte	2	85 cm cada una

Elementos			
Losas/Vigas	horizontales	6	25 cm cada una
Cimentación	Placa metálica	1	30 x 84 cm

Figura 1

Vista lateral y frontal del modelo



Nota. Las dimensiones están en centímetros.

Las conexiones entre elementos están dispuestas mediante soldadura de filete continua en ambas caras de la unión, aplicada a lo largo del ancho de la platina, con el fin de restringir rotaciones que pudieran generarse durante la prueba experimental.

En la base del pórtico se implementó una placa metálica de 30 x 84 cm y 2 cm de espesor, dispuesta como elemento rigidizador para simular la condición de empotramiento en el apoyo.

Tabla 6

Masa de los elementos que configuran el modelo

Elementos	Masa (kg)
Columnas	1.48
Losas/Vigas	1.32
Cimentación	40

6.2. Sistema de Adquisición de Datos (SAD).

El SAD configura la estructura tecnológica para adquirir, procesar y registrar las señales provenientes del comportamiento dinámico del modelo. Este integra hardware de alta precisión a bajo costo, el cual se comunica inalámbricamente (Wi-Fi) para la transmisión de datos en tiempo real. Bajo esta configuración, el sistema garantiza la integridad de los datos en la fase experimental, con un adecuado flujo de información entre los equipos en funcionamiento, tales como los sensores y la estación de monitoreo (laptop).

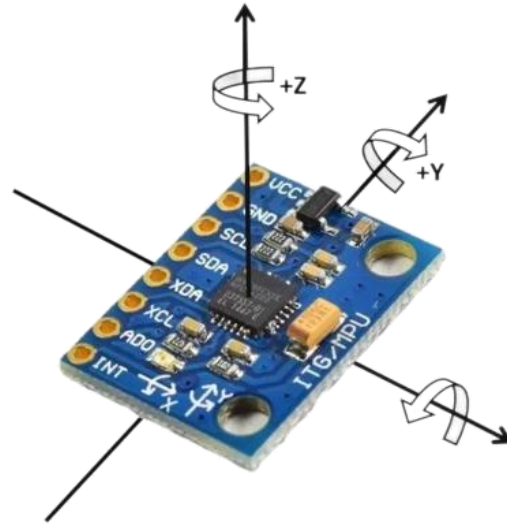
6.2.1. Componentes Individuales del Sistema

Para la construcción del sistema se seleccionaron e implementaron componentes idóneos en el proceso de captura de señales provenientes del objeto de estudio, los cuales cumplen con los requisitos apropiados de sensibilidad y frecuencia en la ejecución experimental de este tipo de proyectos, con la finalidad de obtener resultados precisos en el análisis del modelo. En este apartado, se describen minuciosamente las características de los componentes tecnológicos, con la detallada distinción tecnológica y los alcances operativos en la obtención de registros fidedignos. En seguida, se presentan las especificaciones técnicas de la instrumentación que se utiliza en el desarrollo experimental y en el proyecto global.

6.2.1.1. Unidad de Medición Inercial (IMU) MEMS – MPU 6050. El módulo IMU MPU6050 está integrado por un acelerómetro y un giroscopio el cual es capaz de obtener aceleración lineal y velocidad de rotación en 3 ejes; además, con estos datos, obtiene ángulos de inclinación. Este componente se ha empleado en diversos proyectos como plataformas de estabilización y cálculo de propiedades dinámicas de modelos estructurales, entre otros. Cuenta con un acelerómetro de 3 ejes, giroscopio de 3 ejes y un DMP (Procesador de Movimiento Digital) en total con 6 DOF (Grados de Libertad), estos sensores son de tipo MEMS (Sistemas Microelectromecánicos). En la Tabla 5 (véase Anexo 1) (InvenSense Inc, 2012), se indican las especificaciones del dispositivo.

Figura 2

Módulo IMU MPU 6050



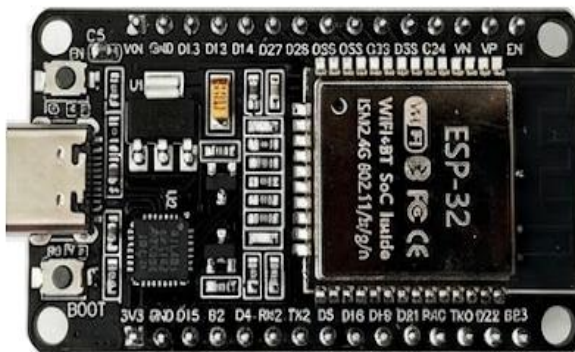
Nota. Módulo MPU 6050 [Imagen], por Electronic Cats, 2019, GitHub

(<https://github.com/ElectronicCats/mpu6050/wiki>). CC BY-NC-SA 3.0.

6.2.1.2. Placa de Desarrollo ESP32. De acuerdo con Ortiz Arciniegas et al. (2025), la ESP32 es una placa de desarrollo de alto rendimiento a bajo costo, la cual se basa en un microcontrolador con estas mismas características. Este dispositivo es capaz de comunicarse con un solo chip a través de Wi-Fi o Bluetooth. El procesador dual-core integrado automatiza procesos de alta complejidad, toma decisiones que se fundamenta en datos y realiza de manera simultánea múltiples tareas. La disposición de pines GPIO, ADC y PWM facilitan la interacción con sensores y actuadores en proyectos de ingeniería. En la Tabla 6 (véase Anexo 2) (Ortiz Arciniegas et al., 2025), se indican las especificaciones del dispositivo.

Figura 3

Placa de desarrollo ESP32

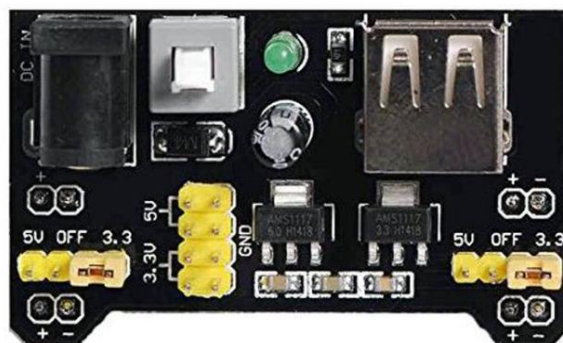


6.2.1.3. Módulo de Fuente de Alimentación MB102. De acuerdo con Kounghshun

Electronic Company (KUONGSHUN Electronic Company, 2023), el MB102 es un dispositivo o módulo de 3.3 cm x 5.2 cm que funciona como fuente de alimentación que simplifica las conexiones de circuitos digitales y es compatible específicamente con protoboards (tablilla de pruebas). Cuenta con dos canales que se controlan de manera independiente mediante el uso de jumpers (puentes), con los cuales se puede configurar el voltaje de entrega (0V, 3.3V o 5V). De igual manera, incorpora un interruptor físico de encendido/apagado con un LED indicativo de funcionamiento. Incluye protección ante cortocircuitos e incorpora pines de salida DC (dos grupos) de 3V y 5V, lo que facilita realizar por medio de cables conexiones externas. Puede ser energizada con un rango de 6.5V a 12 V a través de un Jack DC y simultáneamente alimentar otros dispositivos por intermedio del puerto USB incorporado con una salida de 5V.

Figura 4

Módulo MB102



Nota. Breadboard MB102 [Imagen], por Arduino Forum, 2022,

<https://forum.arduino.cc/t/breadboard-mb102/1013003>

6.2.1.4. Unidad de Almacenamiento de Energía DC. La fuente de energía del SAD está conformado por seis pilas AA de 1.5V, que se disponen en un portapilas de 9.0 cm x 5.7 cm de seis celdas en serie. Este dispositivo es implementado con la finalidad de obtener un funcionamiento estable e independiente para cada uno de los nodos sensores que conforman el sistema global ante las exigencias energéticas del microcontrolador ESP32; por lo tanto, los datos capturados no presentan cortes o saltos, lo cual es fundamental en este tipo de actividades experimentales. Finalmente, este portapilas cuenta con un conector Jack de barril que se introduce directamente al módulo MB102, siendo ambos compatibles entre sí, lo que evita conexiones complejas.

Figura 5

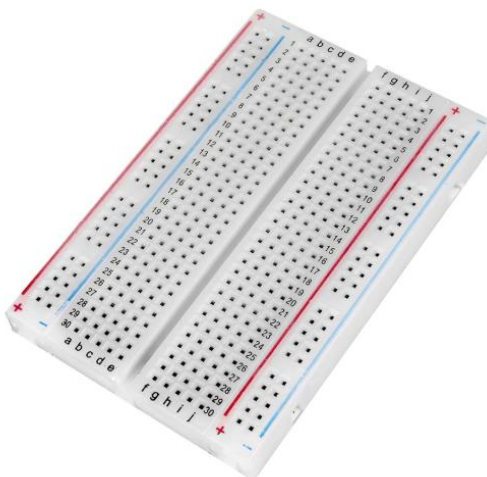
Portapilas AA X6



Nota. Portapilas AA x6 [Fotografía], por Mercado Libre, s.f.,

<https://www.mercadolibre.com.co/portapilas-aa-x6--bateria-pila/up/MCOU2432078986>

6.2.1.5. Placa de Pruebas- Protoboard. Para facilitar la conexión entre los dispositivos que conforman el SAD, se utilizó una mini-protoboard con unas dimensiones de 5.5 cm x 8.3 cm, la cual dispone de 400 puntos; además, es funcional con conexiones que utilizan cables de calibre 29 a 20 según el Calibre de Alambre Estadounidense (American Wire Gauge o AWG por sus siglas en inglés) (Oky Start, 2024). De acuerdo con las especificaciones, este dispositivo cuenta con cuatro secciones, dos externas (buses) y dos internas (pistas) e incluye también un canal central que las divide, lo cual impide la conductividad entre ambas partes. Los buses se utilizan para el suministro energético al circuito; estos cuentan con dos columnas, una para el voltaje (+) de color rojo y otra de conexión a tierra (-) de color azul.

Figura 6*Mini Protoboard*

Nota. Mini Protoboard 400 puntos [Imagen], por Ja-Bots, s.f., <https://ja-bots.com/producto/mini-protoboard-400-puntos/>

6.2.2. Diseño, Construcción y Ensamble del Sistema

6.2.3. Fuente de Energía

La fuente de alimentación es totalmente independiente, con la finalidad de garantizar que el sistema funcione remotamente y no esté conectada directamente a la laptop. Se utiliza como fuente de energía primaria un banco de 6 pilas AA comerciales de 1.5 V cada una por sensor, dispuestas en un portapilas en serie, el cual ofrece un voltaje nominal de 9V.

Este accesorio se conecta directamente en el puerto de barril (Jack) del módulo de fuente de alimentación de energía MB102. Los jumpers se ubican en los pines referentes a 5V, dado que es la tensión adecuada para suministrar energía al ESP32 a través su pin denominado VIN; esto permite que el regulador del microcontrolador instalado internamente opere bajo un

margen térmico seguro. El MB102 se ancla en un extremo de la mini protoboard para energizar los rieles laterales, donde el color rojo corresponde a la columna de 5V y el azul a la tierra (GND).

6.2.4. Instalación del Microcontrolador ESP32

El microcontrolador se ancla en la protoboard mediante los pines de cabecera (Header Pins). Para un adecuado manejo del espacio, se dispone estratégicamente de manera que no interfiera con los otros dispositivos como el sensor y así evitar un posible cortocircuito. Una vez instalado el ESP32 se interconectan de esta manera:

- Riel positivo protoboard (color rojo) al VIN del ESP32.
- Riel negativo protoboard (color azul) al GND del ESP32.
- Riel positivo protoboard (color rojo) al VCC del MPU6050.
- Riel negativo protoboard (color azul) al GND del MPU6050.

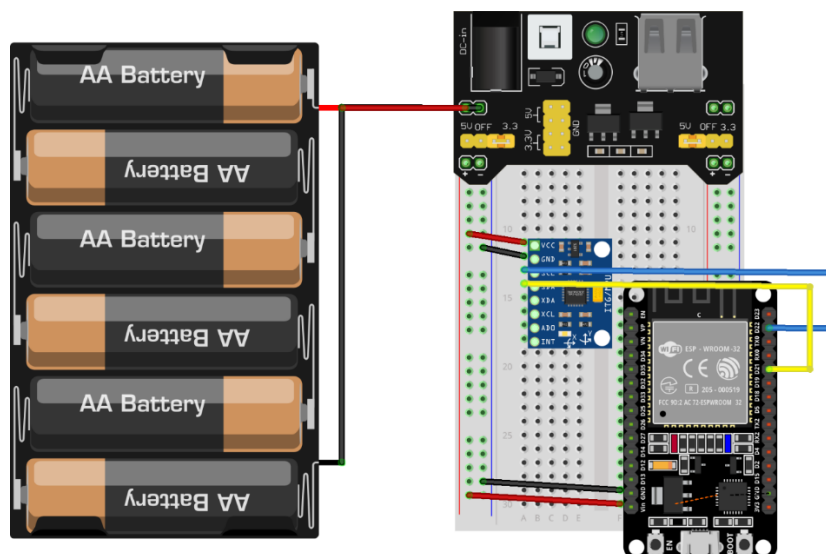
6.2.5. Integración ESP32 y MPU6050

Para una interconexión funcional que permita la comunicación entre el microcontrolador ESP32 y el sensor incorporado en el MPU6050, se dispone de la siguiente configuración bajo el protocolo I2C:

- Pin SDA (Datos) del MPU6050 al GPIO21 del ESP32
- Pin SCL (Reloj): del MPU6050 al GPIO22 del ESP32

Figura 7

Diagrama de conexiones SAD



Nota. El diseño del esquema se realizó en el software Fritzing.

6.2.6. Instalación y Operatividad del Sensor en el Modelo

El sistema correspondiente a los tres dispositivos sensores se ubica y asegura dentro de una carcasa plástica personalizada, diseñada con base en la geometría del sensor y obtenida por medio de impresión 3D; de esta manera, se permita que el microcontrolador envíe y reciba datos vía Wi-Fi sin generar ninguna interferencia o bloqueo de señal. Estos nodos sensores se ubican en el centro de las vigas en los niveles correspondientes de 35 cm (primer nivel), 60 cm (segundo nivel) y 85 cm (tercer nivel). Es esencial restringir el movimiento relativo entre la carcasa y la losa/vigas metálicas del modelo; con este fin, se utiliza cinta adhesiva de doble cara de alta adherencia para garantizar captar las aceleraciones del modelo producidas por las vibraciones inducidas y evitar movimientos locales entre el sensor y la superficie.

Una vez anclados, todos los dispositivos se encienden a través del interruptor incluido de fábrica en el MB102. Estos deben conectarse automáticamente a la laptop vía Wi-Fi local y, posteriormente, emitir señales a una página web local que muestra algunos datos de aceleración en reposo (propios del ruido ambiente) de los ejes X, Y y Z, con el objetivo de observar y guardar los datos de las posteriores vibraciones experimentales.

Figura 8

Ubicación de los sensores en el modelo



6.2.7. Programación del Sistema de Adquisición de Datos (SAD) Mediante Arduino IDE.

Para la obtención y procesamiento de los registros, se desarrolló un firmware en lenguaje C++ (véanse Anexos 2,3 y 4) creado en el entorno de desarrollo Arduino IDE. Este programa es esencial porque permite escribir, compilar y cargar código en diversas placas; en

particular, con el microcontrolador ESP32, lo que facilita su control, además de su compatibilidad intrínseca con la plataforma IDE. Por consiguiente, favorece el empleo y ejecución de librerías especializadas para el procesamiento de señales.

Para que el código funcione específicamente con este dispositivo, el programa Arduino IDE identifica el modelo exacto del núcleo del microcontrolador, para este caso el ESP32 Dev Module. A partir de esta configuración, el compilador administra los registros de memoria y las frecuencias de reloj del procesador, lo que garantiza que el programa se ajuste a la velocidad del procesador para prevenir errores. En relación con este proceso, se reconoce el puerto USB para transferir el código final al microcontrolador.

El firmware desarrollado se basa en la ejecución de las siguientes librerías especializadas con la finalidad de mejorar la comunicación con el ESP32:

- **WiFi.h y ESPAsyncWebServer:** Habilitan la conexión de forma inalámbrica y se encargan de generar el servidor web para que, de esta manera, la transmisión de datos se ejecute en tiempo real.
- **Wire.h:** Responsable de gestionar la comunicación entre el microcontrolador ESP32 y el módulo MPU6050 por medio del protocolo I2C.
- **Adafruit_MPU6050.h:** Se encarga de dar las instrucciones para procesar y convertir las señales obtenidas por el acelerómetro.
- **SPIFFS.h:** Gestiona el almacenamiento del ESP32, donde se albergan los ficheros de la página web.

Inmediatamente después de la completa instalación del código en la memoria Flash del microcontrolador, se procede a comprobar que el bus I2C reconoce al MPU6050 a través del Monitor Serie. Este permite verificar exitosamente o no la operatividad del nodo sensor, el cual, una vez funcione correctamente cuenta con la capacidad de registrar y enviar los datos de las vibraciones dinámicas desarrolladas en la fase experimental.

6.2.8. Desarrollo de Página Web para el Funcionamiento de Sistema de Adquisición de Datos (SAD)

Debido a que los datos obtenidos de aceleración en bruto pueden ser disruptivos visualmente, se desarrolló una página web (véase Anexo 5) confortable estéticamente con la capacidad de mostrar las señales adquiridas en los tres ejes X, Y, y Z, de cada nivel, por los sensores activos en tiempo real. Esta interfaz controla remotamente el tiempo de los ensayos experimentales y puede guardar los registros cronometrados capturados por los dispositivos de manera automática y simultánea.

Esta página está basada en el empleo de tres lenguajes de programación web: HTML (HyperText Markup Language), CSS (Cascading Style Sheets) y JavaScript (JS). En las opciones disponibles de la página web, contiene la opción de cronometrar el tiempo de duración del ensayo y un botón de inicio de la toma de datos; todo lo anterior es controlado de manera remota desde una laptop. Una vez iniciada la prueba y tan pronto como el cronómetro llega a cero, el sistema está automáticamente programado para descargar y guardar los registros crudos en archivos independientes de formato .CSV.

El empleo de este formato es fundamental, ya que puede ser leído por un programa desarrollado en MATLAB, el cual tiene integrado algoritmos para filtrar y procesar las señales con la finalidad de calcular directamente las propiedades dinámicas del modelo.

Figura 9

Interfaz web para el control experimental y captura de registros



La página web es administrada externamente y su operatividad se controla directamente desde una laptop. El protocolo Server-Sent Events (SSE) se encarga de conectar las placas de desarrollo ESP32 inalámbricamente a las direcciones IP estáticas independientes asignadas; por ende, la captura de datos es ejecutada de forma sincrónica a 100 Hz, lo cual evita saturar el procesamiento de los microcontroladores. De esta manera, se garantiza la total eficiencia del sistema global sin un consumo desproporcionado de la memoria local de estas placas.

6.2.9. Desarrollo de Programa Matlab para la Determinación de las Propiedades

Dinámicas

Inmediatamente a continuación de la culminación de la fase experimental, los datos de aceleración deben ser gestionados a través de un algoritmo desarrollado en MATLAB (véanse Anexo 6), el cual se encarga de procesar las señales; específicamente en etapas que depuran la señal y, por consiguiente, obtienen una fiel representación de las propiedades dinámicas del modelo.

Este procedimiento inicia con el acondicionamiento de la señal, que incluye los siguientes pasos:

Detrending: El objetivo está centrado en ubicar la señal alrededor del cero y no en torno a 9.81 m/s^2 (valor de la gravedad), mediante el cálculo del promedio de los datos obtenidos experimentalmente (que representa la gravedad y el error constante generado por la placa); después se resta el promedio obtenido a todos los datos medidos.

Filtrado digital de Butterworth: Se fundamenta en la aplicación de un filtro de cuarto orden tipo pasa-banda, el cual aplica frecuencias de corte de 0.5 Hz y 47 Hz, con el fin de eliminar ruidos de baja o alta frecuencia impropios de la estructura, respectivamente. De este modo, los 47 Hz es un valor fijado en el cálculo algorítmico desarrollado en Matlab que delimita el rango de análisis sin sobrepasar el límite de Nyquist (50 Hz), lo cual garantiza que no se origine solapamiento (aliasing) en el procesamiento de los resultados.

En seguida, se emplea el Método de Welch (1967) para efectuar la transición del dominio del tiempo al de la frecuencia, el cual fracciona la señal en ocho segmentos con un solape (overlap) del 50% y la aplicación de una Ventana de Hamming. Como resultado de disminuir la varianza del error, se obtiene la Densidad Espectral de Potencia (PSD) en alta resolución, lo cual facilita la identificación de los picos de resonancia.

En este punto, el programa está en la facultad de detectar la frecuencia natural del modelo, por medio de la aplicación de Peak Picking, la cual identifica los picos espectrales donde existe una mayor concentración de densidad de energía. Finalmente, se determina las propiedades dinámicas del modelo, a través de las etapas indicadas a continuación:

- **Frecuencia natural:** Se determina por medio de la aplicación de Peak Picking, la cual identifica los picos espectrales donde existe una mayor concentración de densidad de energía.
- **Razón de amortiguamiento:** Este valor es calculado con base en la geometría del pico referente al modo fundamental de vibración determinado en la PSD. El algoritmo desarrollado en MATLAB aplica el Método del Ancho de Banda de Media Potencia, el cual determina el ancho de la cresta a mitad de la potencia máxima; por ende, se estima el valor de disipación de energía del pórtico.
- **Formas modales:** Dado que el registro de aceleraciones se realizó de manera independiente en cada nivel del pórtico, el algoritmo está programado para tomar como referencia de control el sensor dispuesto en el tercer piso del modelo para calcular la

CSD y la función de transmisibilidad. El vector propio normalizado caracteriza la deformación geométrica en el espacio de la estructura para cada modo de vibración, este se determina al evaluar la magnitud relativa y el ángulo de fase a partir de cada frecuencia natural.

6.2.10. Experimentación Práctica

Con la operatividad funcional del Sistema de Adquisición de Datos (SAD) y la interfaz web en línea, se ejecuta el Análisis Modal Experimental (EMA) basado en la medición de la vibración libre a través de un leve impacto para tres pruebas de 100 segundos. Cada prueba se realiza de la siguiente manera:

Fase de reposo inicial: Antes de iniciar la prueba, los sensores y el modelo deben estar en total reposo. El inicio se da desde la página web y el reposo inicial debe tener una duración de aproximadamente 30 segundos antes de aplicar el impacto.

Aplicación del impacto: Con el empleo de un martillo de goma, se aplica un leve golpe en la parte más alta del pórtico (85 cm), lo cual induce aceleraciones en los modos de vibración del modelo.

Fase de decaimiento: Una vez suministrado el impacto, se deja a la estructura disipar esa energía aplicada sin ninguna intervención. Este intervalo de cincuenta segundos es apropiado para obtener los datos necesarios y realizar un análisis espectral adecuado.

Cuando el tiempo de prueba finaliza, se descargan automáticamente los resultados del experimento en formato .CSV, para ser procesados por el algoritmo de MATLAB previamente

desarrollado, probado y descrito anteriormente. De esta manera, y aplicando los pasos descritos previamente, se obtienen las propiedades dinámicas del modelo y se procede con el registro de los resultados para el análisis concluyente.

Se realizaron dos tipos de pruebas, en las cuales se tiene en cuenta la ubicación y el número de sensores utilizados en las mediciones, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7

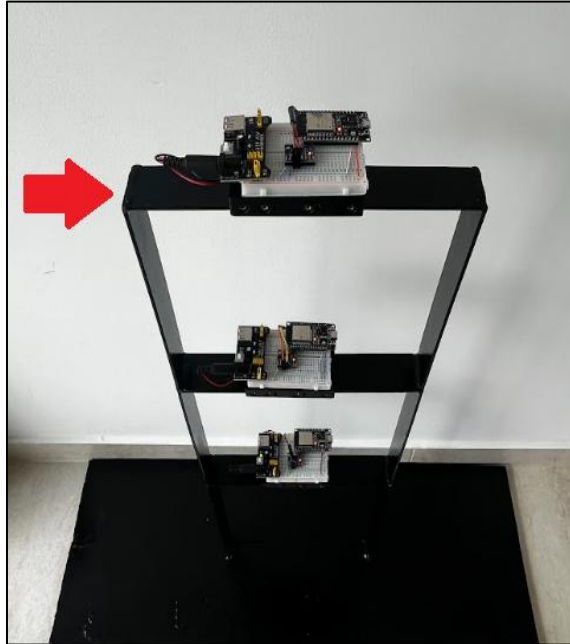
Tipo de pruebas experimentales desarrolladas

Prueba	Cantidad y ubicación de los sensores	Propiedad dinámica objeto de estudio
Tipo 1	Un sensor	Frecuencias naturales en los modos de vibración.
	Exclusivamente en el tercer nivel	Razón de amortiguamiento.
Tipo 2	Tres sensores	Frecuencias naturales en los modos de vibración.
	Distribuidos en todos los niveles	Formas modales.

Nota. Ejecución de dos variantes experimentales para la determinación de las propiedades dinámicas del pórtico.

Figura 10

Proceso experimental aplicando EMA



6.3. Modelo Numérico de Elementos Finitos y Análisis Dinámico del Pórtico a Escala

(Comprobación Numérica)

6.3.1. Formulación del Elemento Viga - Columna

El modelo del pórtico se construyó mediante la aplicación del modelo de elementos finitos (FEM), para el cual se caracterizaron los elementos viga - columna plana con tres grados de libertad por cada nodo, entendiéndolos como: Desplazamiento axial (u), Desplazamiento transversal (w), y rotación (θ). La formulación que se desarrolla contempla el comportamiento del elemento viga de Euler - Bernoulli, la cual se fundamenta en que las secciones planas y perpendiculares al eje neutro tras la deformación, desprecia las deformaciones por cortante (Bathe, 2021).

En este sentido, la matriz de rigidez local de un elemento de longitud (L_e), módulo de elasticidad (E), área de sección transversal (A) e inercia (I) es:

$$k_e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L_e} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L_e} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L_e^3} & \frac{6EI}{L_e^2} & 0 & -\frac{12EI}{L_e^3} & \frac{6EI}{L_e^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L_e^2} & \frac{4EI}{L_e} & 0 & -\frac{6EI}{L_e^2} & \frac{2EI}{L_e} \\ -\frac{EA}{L_e} & 0 & 0 & \frac{EA}{L_e} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L_e^3} & -\frac{6EI}{L_e^2} & 0 & \frac{12EI}{L_e^3} & -\frac{6EI}{L_e^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L_e^2} & \frac{2EI}{L_e} & 0 & -\frac{6EI}{L_e^2} & \frac{4EI}{L_e} \end{bmatrix}$$

Esta es la matriz implementada en el código del software de MATLAB, para los 9 elementos que componen el pórtico (6 columnas y 3 vigas), el cual se observa en el Anexo 7.

Posteriormente, se aplica el método de la transformada (T), donde esta corresponde a la transformación geométrica basada en los cosenos de cada una de las matrices locales de los elementos, de la siguiente manera:

$$k_e = T^T k_e T \quad (11)$$

Finalmente, la matriz global de rigidez se obtiene mediante el ensamblaje de:

$$K = \sum k_e \quad (12)$$

6.3.2. Propiedades de la Sección Transversal

Como punto de partida de la modelación se considera una sección rectangular tipo platina de acero de dimensiones $1 \frac{1}{2}'' \times 1 \frac{1}{8}''$, cuyas disposiciones y características son acorde

con las contempladas experimentales y sus propiedades definidas según las especificaciones técnicas del fabricante. Es relevante considerar los momentos de inercia principales asociados al eje débil y otro al eje fuerte, los cuales dependen directamente de la disposición de los elementos en el pórtico.

Dado que la excitación del pórtico se desarrolla en el plano $x-z$, se considera que las vigas se encuentran rotadas 90° respecto a las columnas, lo que repercute directamente en que las columnas trabajarán en su eje débil y las vigas por el contrario trabajarán respecto a su eje fuerte, las propiedades geométricas utilizadas en la modelación numérica se presentan en la Tabla 5.

Por otra parte, esta configuración del sistema presenta una mayor sensibilidad a excitaciones de baja energía, permitiendo la caracterización modal a partir de vibraciones ambientales o excitaciones controladas de pequeña magnitud, justificando la adopción del modelo de Euler-Bernoulli, en el cual se desprecia la deformación por cortante, simplificando el desarrollo analítico y la formulación matricial del sistema estructural.

Tabla 8

Propiedades geométricas y dinámicas del pórtico según modelación numérica

Elementos	Area (m ²)	I_t (m ⁴)	I_b (m ⁴)
Sección 1 1/2" x 1/8"	8.0645×10^{-5}	6.774×10^{-11}	4.336×10^{-11}

Nota. I_t es la Inercia eje débil; I_b es la inercia eje fuerte.

6.3.3. Matriz de Masa Consistente

Con el fin de representar adecuadamente la distribución de masa en los elementos estructurales del pórtico se optó por implementar la matriz de masa consistente, la cual es más representativa que la masa concentrada en términos de precisión para la obtención de modos superiores al primero (Clough y Penzien, 2003).

La masa total de cada elemento se obtuvo mediante las propiedades geométricas y del material:

$$m_e = \rho AL \quad (13)$$

donde, ρ es la densidad; A se define como el área transversal del elemento; L es la longitud del elemento. A partir de esta masa y bajo las premisas de comportamiento, se obtiene la matriz de masa consistente en coordenadas locales de los elementos, mediante la aplicación de la metodología Euler – Bernoulli, como:

$$M_e = \frac{\rho AL_e}{420} = \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

Esta formulación se transforma mediante las funciones de forma del elemento, lo cual permite representar correctamente los efectos inerciales distribuidos del sistema estructural, obteniendo la siguiente matriz transformada del sistema global:

$$M_e^g = T^T M_E T \quad (14)$$

Definiendo así la matriz global de masa de la siguiente manera:

$$M = \sum M_e^g \quad (15)$$

6.3.3.1. Masas Adicionales. El modelo contempla masas adicionales concentradas en los nodos de cada piso, correspondiente a componentes físicos del sistema experimental, tales como los sensores (masas instrumentales) y elementos de refuerzo estructural.

Dichas masas se modelaron como masas puntuales aplicadas en los nodos correspondientes, contribuyendo a los grados de libertad traslacionales (U_x y U_z), acorde con la formulación de masa concentrada:

$$\Delta M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}$$

Esta práctica empleada es característica de la metodología FEM, ya que, si bien estas masas adicionales no son representativas para su rigidez, si representan una condición diferencial para su inercia y su desestimación incurre en desviaciones en los resultados obtenidos para la frecuencia natural

6.3.3.2. Masas Globales del Sistema Aplicadas a la Metodología Numérica. Para el presente desarrollo metodológico la masa consistente produce estimaciones de frecuencias naturales más precisas y aproximadas al comportamiento real del pórtico, aunado a esto la inclusión de masas instrumentales es metodológicamente necesaria, a fin de prevenir las discrepancias sistemáticas entre el modelo y las respuestas medidas experimentalmente.

Tabla 9*Masas consideradas en el modelo numérico*

Elementos	Descripción	Masa Unitaria (kg)	Cantidad	Masa total (kg)
	Platinas que			
Sección 1 1/2" x 1/8"	conforman columnas y vigas del pórtico	--	9	1.566
Sección 1 1/2"x 1/8"	Refuerzos horizontales	0.155	1	0.155
(Masa adicional estructural)	soldados en cada nivel			
Masa instrumental	Sensores instalados en los niveles 1, 2 y 3	0.250	3	0.750
Masa total del sistema	–	–	–	2.471

Nota: las masas adicionales y la masa instrumental se incorporó como masas concentradas en los GDL traslacionales de los nodos correspondientes de cada nivel.

6.3.4. Modelación del Amortiguamiento

Teniendo en consideración que el problema modal típico no considera mecanismos disipativos, se considera pertinente implementar el modelo de amortiguamiento viscoso proporcional de Rayleigh, en consecuencia, se formula la matriz de amortiguamiento de la siguiente manera:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (16)$$

donde C se define como la matriz global de amortiguamiento; α se establece como el coeficiente proporcional a la masa; M es la matriz global de masa; β está definido como el coeficiente proporcional a la rigidez; K se entiende como la matriz global de rigidez.

Los coeficientes de Rayleigh fueron obtenidos imponiendo una razón de amortiguamiento modal objetivo del 2% para el primer y tercer modo de vibración, implementando la siguiente relación modal:

$$\zeta_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \quad (17)$$

Esta representación del amortiguamiento viscoso permite representar de manera aproximada los mecanismos de disipación energética que se observan en el modelo real, asociados a la fricción en conexiones, pérdidas locales y la interacción entre elementos soldados. (Clough y Penzien, 2003).

6.3.5. Solución del Problema Modal

Las propiedades dinámicas del sistema se determinan resolviendo el problema generalizado de autovalores(Clough y Penzien, 2003):

$$K\phi = \omega^2 M\phi \quad (18)$$

donde K se define como la matriz global de rigidez; ϕ se establece como el vector modal; ω es la frecuencia natural y M está definida como la matriz global de masa.

Este procesamiento se apoyó con el software MATLAB, mediante la función *eigs()*, que permitieron obtener los primeros modos de vibración del pórtico evaluado. Por otra parte, determinan las frecuencias naturales del pórtico, mediante la solución del problema generalizado de autovalores que se presentó en la ecuación 19, lo cual permite establecer la frecuencia natural en Hertz en cada nodo mediante la siguiente ecuación:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (19)$$

7. Resultados y Análisis

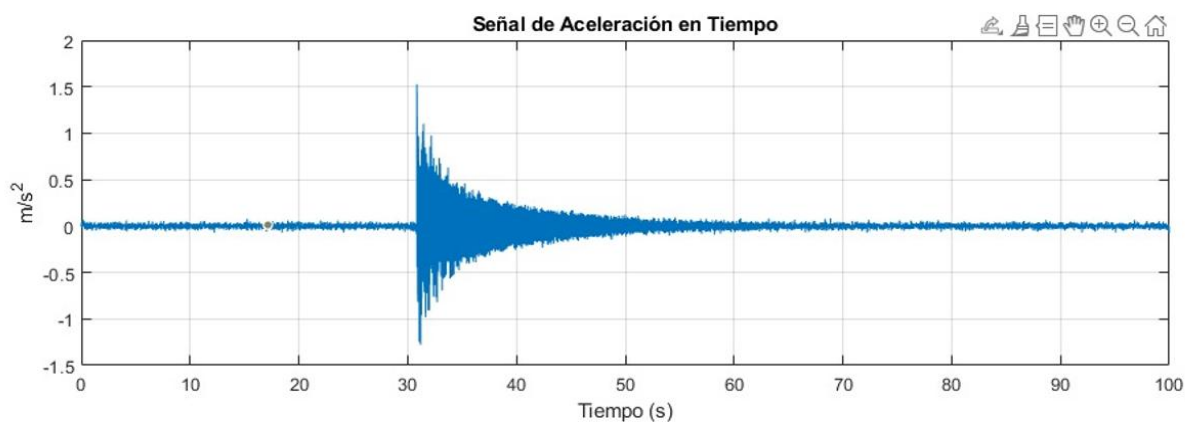
7.1. Resultados de Procesamiento Experimental

Con base en la aplicación del procedimiento descrito en la metodología, se determinan las propiedades dinámicas del modelo a partir de los resultados procesados. Adicionalmente, se corroboró el correcto funcionamiento de los nodos sensores y, en general, del SAD mediante ensayos preliminares, con la finalidad de descartar cualquier error en el funcionamiento físico y electrónico que pueda generar incertidumbre en la calidad de los registros.

Se ejecutaron tres pruebas EMA Tipo 1 (la cual se referencia en la Tabla 7) de 100 segundos, para corroborar la concordancia y la calidad de los datos capturados por el nodo sensor, sin lugar a discrepancias o señales deficientes, las cuales dan paso a análisis deficientes que no corresponden al comportamiento de la estructura analizada.

Figura 11

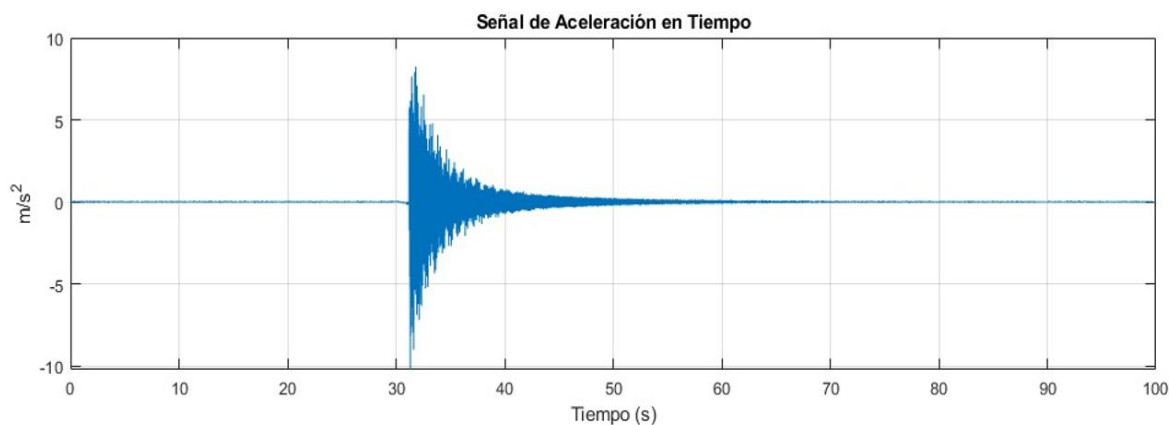
Registros de aceleración acondicionados mediante EMA bajo un impacto leve



Nota. Señal acondicionada mediante detrending y filtrado digital (Butterworth).

Figura 12

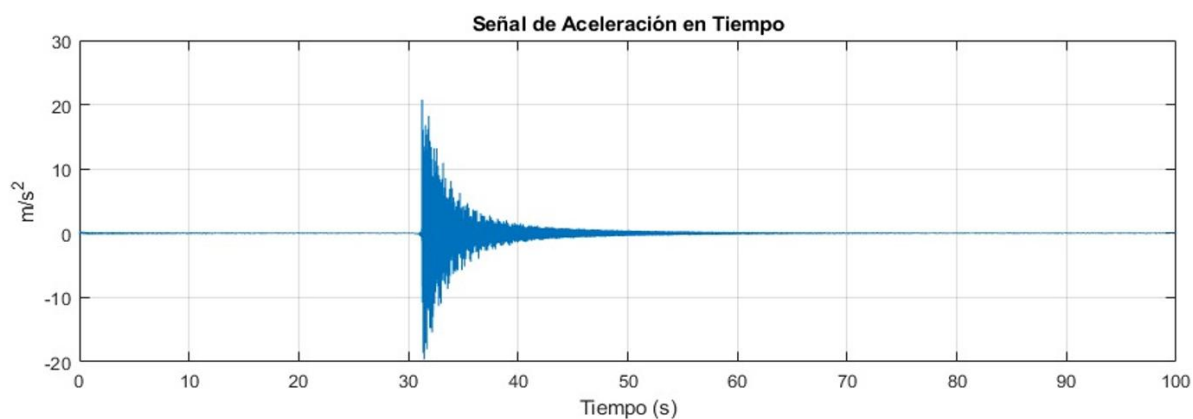
Registros de aceleración acondicionados mediante EMA bajo un impacto moderado



Nota. Señal acondicionada mediante detrending y filtrado digital (Butterworth).

Figura 13

Registros de aceleración acondicionados mediante EMA bajo un impacto fuerte



Nota. Señal acondicionada mediante detrending y filtrado digital (Butterworth).

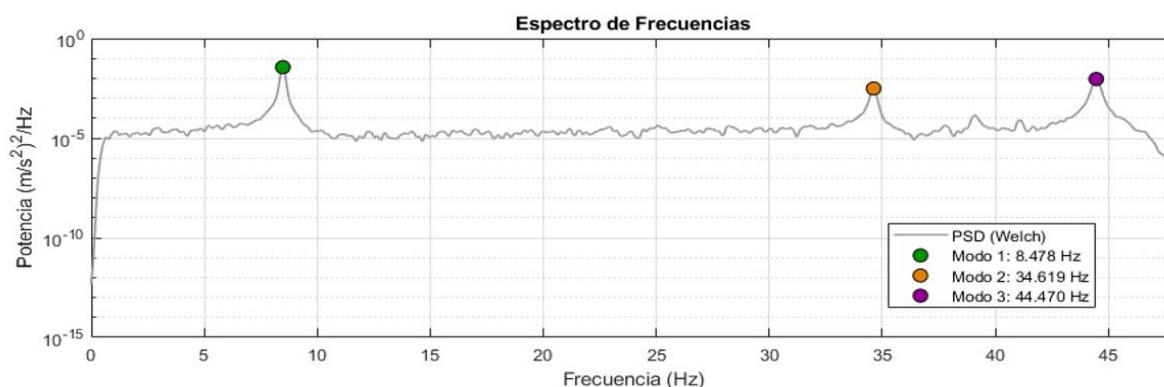
Con la aplicación del acondicionamiento, se busca que la señal no presente un desfase estático por consecuencia de la gravedad o pequeñas deficiencias en la inclinación del sensor; por lo tanto, se fuerza a la señal a desplazarse alrededor de $0.0m/s^2$. Adicionalmente, la

aplicación del filtrado digital limpia la señal de ruido, el cual elimina frecuencias bajas menores a 0.5 Hz correspondiente a un balanceo sumamente lento; además, depura señales de alta frecuencia mayores a 47 Hz propias del ruido eléctrico generalmente. Finalmente, los datos son filtrados tanto hacia adelante como hacia atrás, lo cual impide la distorsión de fase en el preciso instante de golpear levemente el pórtico.

Una vez los registros de aceleración son depurados, se obtiene el espectro de frecuencias graficado en la Figura 14, 15 y 16 en los cuales se identifican los puntos más altos del gráfico mediante *peak picking* referente a las frecuencias naturales fundamentales (f_n) de los modos 1, 2 y 3, del sistema. El código determina este punto de manera automática y registra el valor como resultado.

Figura 14

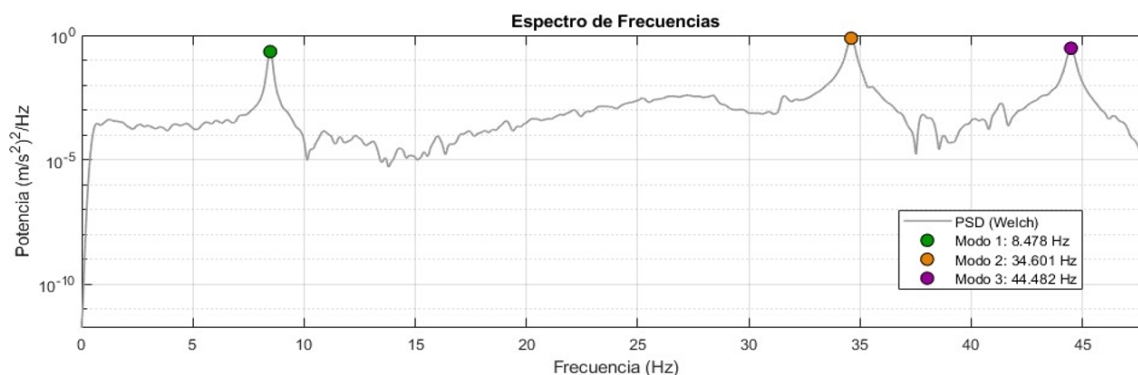
Espectro PSD adquirido mediante EMA bajo un impacto leve



Nota. Las frecuencias dominantes de los modos 1, 2 y 3 del espectro son identificadas con un círculo relleno de color verde, naranja y morado, respectivamente.

Figura 15

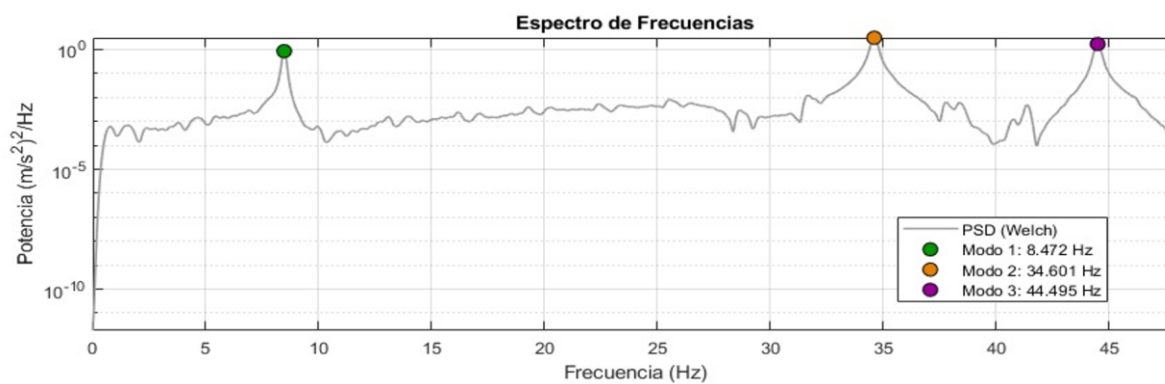
Espectro PSD adquirido mediante EMA bajo un impacto moderado



Nota. Las frecuencias dominantes de los modos 1, 2 y 3 del espectro son identificadas con un círculo relleno de color verde, naranja y morado, respectivamente.

Figura 16

Espectro PSD adquirido mediante EMA bajo un impacto fuerte



Nota. Las frecuencias dominantes de los modos 1, 2 y 3 del espectro son identificadas con un círculo relleno de color verde, naranja y morado, respectivamente.

Para obtener las gráficas anteriores Figura 14 15 y 16, se descompusieron las señales originales correspondientes a las aceleraciones capturadas por los sensores en las frecuencias

puras que la componen, proceso que describe la descomposición espectral mediante la aplicación de la transformada de Fourier. Para lo cual, también, se aplicó la FFT acoplada al método de Welch, que suaviza la variación de las fluctuaciones que presentan estas señales, resultado del ruido eléctrico intrínseco en el sistema o por elementos diferentes al pórtico.

Estos gráficos muestran en el eje X las frecuencias en hercios (Hz) y en el eje Y la densidad espectral de potencia que tiene ese movimiento; por ende, las zonas bajas corresponden a ruido de fondo, donde el pórtico no presenta movimientos; por el contrario, en los picos más altos se concentra la mayor cantidad de energía cinética y movimiento del pórtico generado por la aplicación del impacto.

En la tabla 10, 11 y 12 se registran los datos obtenidos en tres pruebas, las cuales presentan una variación de potencia en el impacto (leve, moderado y fuerte), con la finalidad de tener un conocimiento preciso del comportamiento real de la estructura, lo cual evita falsos positivos y da consistencia a los resultados.

Tabla 10

Frecuencias naturales del pórtico para cada modo de vibración bajo un impacto leve

Modo	Frecuencia (Hz)
1	8.478
2	34.619
3	44.470

Nota. Resultados a partir de aplicar un golpe leve a la estructura.

Tabla 11

Frecuencias naturales del pórtico para cada modo de vibración bajo un impacto moderado

Modo	Frecuencia (Hz)
1	8.478
2	34.601
3	44.482

Nota. Resultados a partir de aplicar un golpe moderado a la estructura.

Tabla 12

Frecuencias naturales del pórtico para cada modo de vibración bajo un impacto fuerte

Modo	Frecuencia (Hz)
1	8.472
2	34.601
3	44.495

Nota. Resultados a partir de aplicar un golpe fuerte a la estructura.

De acuerdo con los resultados de las Tablas 10, 11 y 12, se determinan los valores definitivos de las frecuencias mediante el cálculo del promedio de los valores para cada uno de los modos (1,2 y 3).

Tabla 13

Frecuencias naturales promediadas

Modo	Frecuencia (Hz)
1	8.476

2	34.607
3	44.482

Nota. Resultados del promedio de las frecuencias en tres pruebas distintas.

Una vez calculadas las frecuencias, mediante el Método del Ancho de Banda de Media Potencia se determina el valor de la razón de amortiguamiento. El algoritmo identifica en las montañas del espectro el valor del amortiguamiento a partir de la forma de estos picos; donde un amortiguamiento reducido está representado por una forma de pico delgada, alta y puntiaguda; por el contrario, un amortiguamiento mayor se ve reflejado en una montaña ancha, baja y allanada.

Por lo tanto, matemáticamente se determina el ancho de esas crestas a media de potencia máxima. Al igual que para las frecuencias, los valores de razón de amortiguamiento vienen dados al promediar los valores experimentales.

Tabla 14

Razón de amortiguamiento para cada modo de vibración bajo un impacto leve

Modo	Razón de amortiguamiento (ζ) (%)
1	1.12
2	0.38
3	0.37

Nota. Valores razón de amortiguamiento para los 3 modos de vibración.

Tabla 15

Razón de amortiguamiento para cada modo de vibración bajo un impacto moderado

Modo	Razón de amortiguamiento (ζ) (%)
1	1.08
2	0.44
3	0.35

Nota. Valores razón de amortiguamiento para los 3 modos de vibración.

Tabla 16

Razón de amortiguamiento para cada modo de vibración bajo un impacto fuerte

Modo	Razón de amortiguamiento (ζ) (%)
1	1.08
2	0.47
3	0.36

Nota. Valores razón de amortiguamiento para los 3 modos de vibración.

Tabla 17

Razón de amortiguamiento promedio para cada modo de vibración

Modo	Razón de amortiguamiento (ζ) (%)
1	1.09
2	0.43
3	0.36

Nota. Resultados promedio razón de amortiguamiento en tres pruebas distintas.

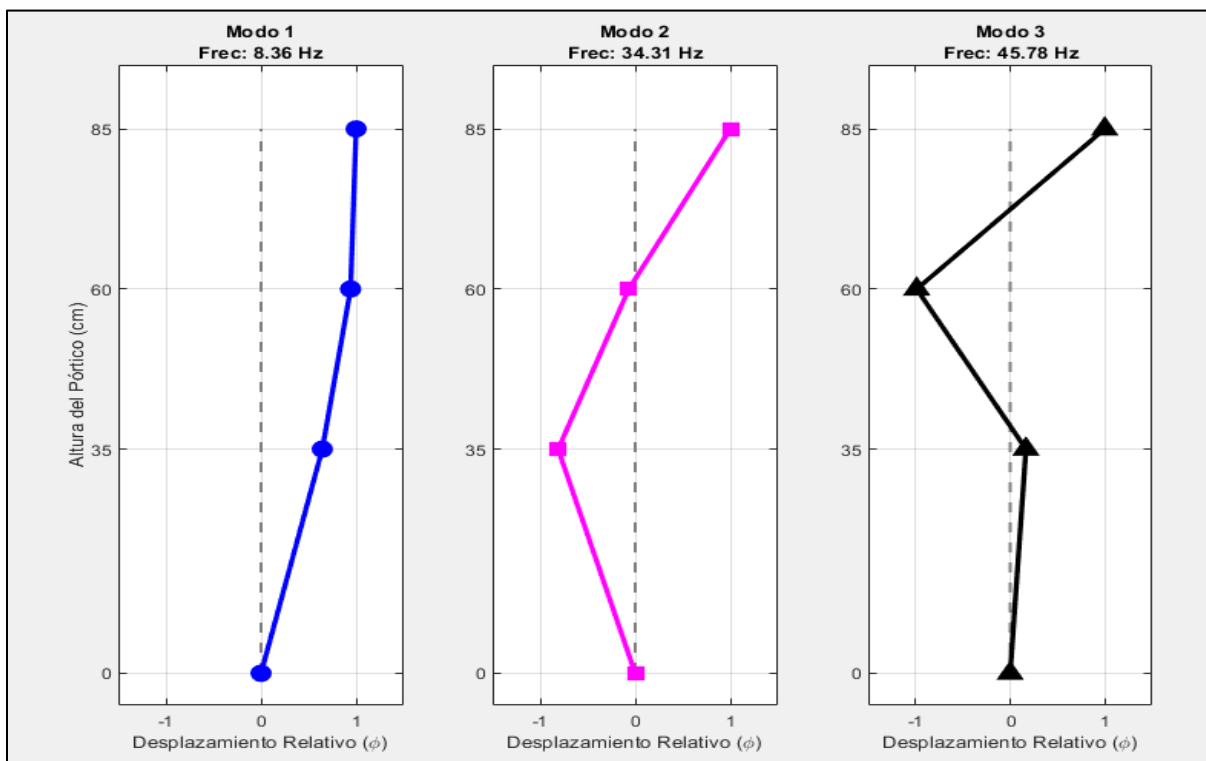
Con la disposición de los tres sensores en los tres niveles, calibrados y sincronizados, mediante el cálculo de la CSD y la Función de Transmisibilidad se determinaron las formas modales del modelo, las cuales muestran gráficamente el movimiento espacial del pórtico para cada frecuencia natural.

Esto se determinó a través del desfase de las señales y la relación de amplitud de las señales en las cimas del espectro PSD; por consiguiente, se vuelve imperativo el ajuste adecuado de los nodos sensores, específicamente ubicados en el centro de cada viga/losa dispuestos en los tres niveles y además, su operatividad inicial simultánea programada en el código de la interfaz web, con la finalidad de evitar desfases que generen formas incongruentes del desplazamiento normal de las formas modales.

La gráfica de la Figura 17 muestra el aspecto del movimiento que presenta la estructura cuando está sometida a una estimulación (impacto).

Figura 17

Formas modales experimentales



Nota. Formas modales experimentales normalizadas, MATLAB.

Como señala las gráficas de la Figura 17 referente a las formas modales encontradas, se identifica la distribución espacial del movimiento presentada por pórtico ante la aplicación de EMA. Para el Modo 1, el total de la masa (niveles 1,2 y3) muestra un movimiento hacia una sola dirección, lo que precisa un movimiento puramente traslacional.

En el Modo 2 la línea del movimiento estructural corta una vez el equilibrio en cero a una altura de 60 cm, lo cual evidencia un cambio de fase, donde el desplazamiento máximo se indica en el tercer nivel.

Finalmente, para el Modo 3 se identifica que la línea corta dos veces el punto de equilibrio, comportamiento propio de este modo; por lo tanto, esto significa un indicio adecuado de un buen comportamiento e identificación de las formas modales del pórtico.

Adicionalmente, la obtención de formas modales se ejecutó mediante una prueba Tipo 2 (como se referencia en la Tabla 7) y requirió de un alineamiento preciso en los ejes centrales de los elementos viga/columna.

Esto se realizó con el propósito de una adecuada ubicación de los sensores y aplicación correcta de la Función de Transmisibilidad Espectral Relativa basada en CSD, en función del nodo sensor referencial dispuesto en el nivel 3.

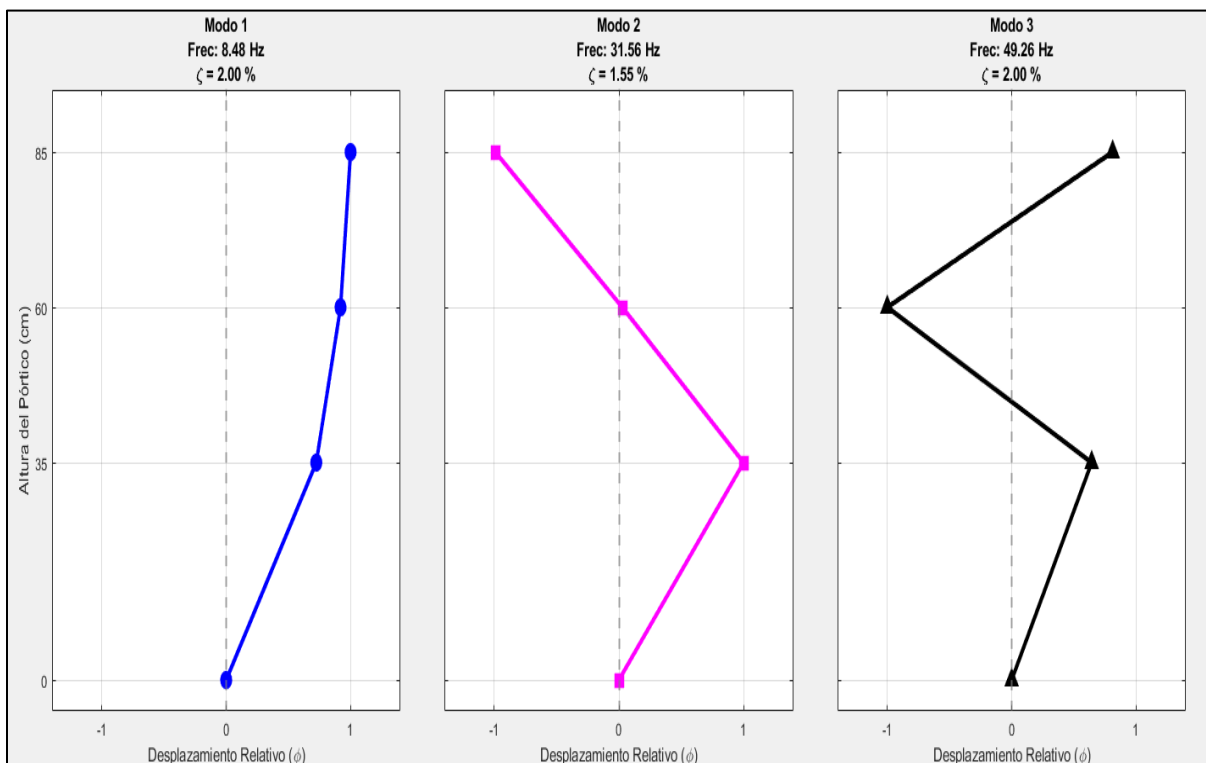
7.2. Resultados del Modelo Numérico

Las frecuencias naturales obtenidas mediante la metodología FEM representan las condiciones dinámicas teóricas del pórtico; en consecuencia, establecen un parámetro fundamental para la comparación con los resultados experimentales.

La Figura 18 presenta las formas modales del pórtico, a través de la aplicación de los conceptos previamente mencionados y el código desarrollado en el software MATLAB (Anexo 7).

Figura 18

Formas modales del modelo numérico mediante FEM



Nota. Formas modales teóricas normalizadas, MATLAB.

De acuerdo con la Figura 18, donde se plasman las formas modales obtenidas matemáticamente en MATLAB para el pórtico en estudio, los valores de las frecuencias naturales son de 8.48 Hz (Modo 1), 31.56 Hz (Modo 2) y 49.26 Hz (Modo 3).

Las formas determinadas muestran un comportamiento en el cual predomina la flexión del sistema, en donde el primer modo se denota una deformada global con desplazamientos crecientes en su altura, característico de estructuras aporticadas con baja rigidez lateral. El segundo modo denota un cambio de curvatura asociado a la partición del nodo intermedio, que

se traduce en mayor participación relativa entre niveles. Finalmente, el tercer modo exhibe inversiones de fases pronunciadas, relacionado con mecanismos vibratorios de orden superior.

Las formas modales presentadas fueron normalizadas respecto al desplazamiento máximo, con el fin de facilitar la comparación física con los resultados experimentales. Asimismo, las frecuencias naturales obtenidas reflejan la influencia combinada de la rigidez de las platinas, la distribución de masas del sistema y, un factor relevante, referente a la incorporación de las masas propias de los nodos sensores.

7.3. Comparación entre Resultados Experimentales y Numéricos

7.3.1. Comparativo de Frecuencias la Comparación entre Frecuencias Naturales Experimentales y Numéricas

Con la finalidad de evaluar el nivel de aproximación entre el modelo numérico implementado en MATLAB en contraste con el comportamiento real del pórtico a escala, se realizó una comparación directa entre las frecuencias naturales experimentales promedio, obtenidas a partir de los tres ensayos según nivel de impacto, y las frecuencias calculadas mediante el modelo numérico.

Dado que el valor experimental es la representación de la respuesta física del sistema, este se define como referencia para cuantificar la discrepancia; en este sentido, la discrepancia porcentual para cada modo se calculó mediante la ecuación 20.

$$\Delta_i = \frac{|f_{FEM,i} - f_{EXP,i}|}{f_{EXP,i}} * 100 \quad (20)$$

donde Δ_i se define como la discrepancia porcentual del modo $i(\%)$; $f_{FEM,i}$ es la frecuencia natural obtenida mediante el modelo FEM del modo $i(\text{Hz})$; $f_{EXP,i}$ se establece como la frecuencia natural experimental promedio del modo $i(\text{Hz})$.

Figura 19

Comparación de frecuencias naturales y evaluación del modelo numérico

Modo	Promedio Exp. (Hz)	FEM	Discrepancia
		MATLAB (Hz)	(%)
1	8.476	8.479	0.035
2	34.607	31.562	8.799
3	44.482	49.263	10.748
Promedio	–	–	6.527

Los resultados expuestos en la Tabla 15 evidencian una alta correlación en el primer modo de vibración, con una discrepancia de 0.035%; para los modos superiores este valor aumenta siendo de 8.799% para el segundo modo y 10.748% para el tercer modo. Por lo tanto, estos resultados indican que el modelo representa adecuadamente el comportamiento dinámico del sistema, especialmente en su modo fundamental.

No obstante, el modelo numérico subestima la frecuencia del segundo modo y sobreestima la del tercer modo, lo cual es atribuible a posibles diferencias en la distribución local de la rigidez, la idealización de las condiciones de frontera y la influencia de efectos no modelados. En conjunto los resultados, permiten considerar la validez del modelo para la

caracterización dinámica del pórtico, dentro de los márgenes esperables en ensayos experimentales.

7.3.2. Comparativo de Comportamiento Modal de Resultados Experimentales y Numéricos

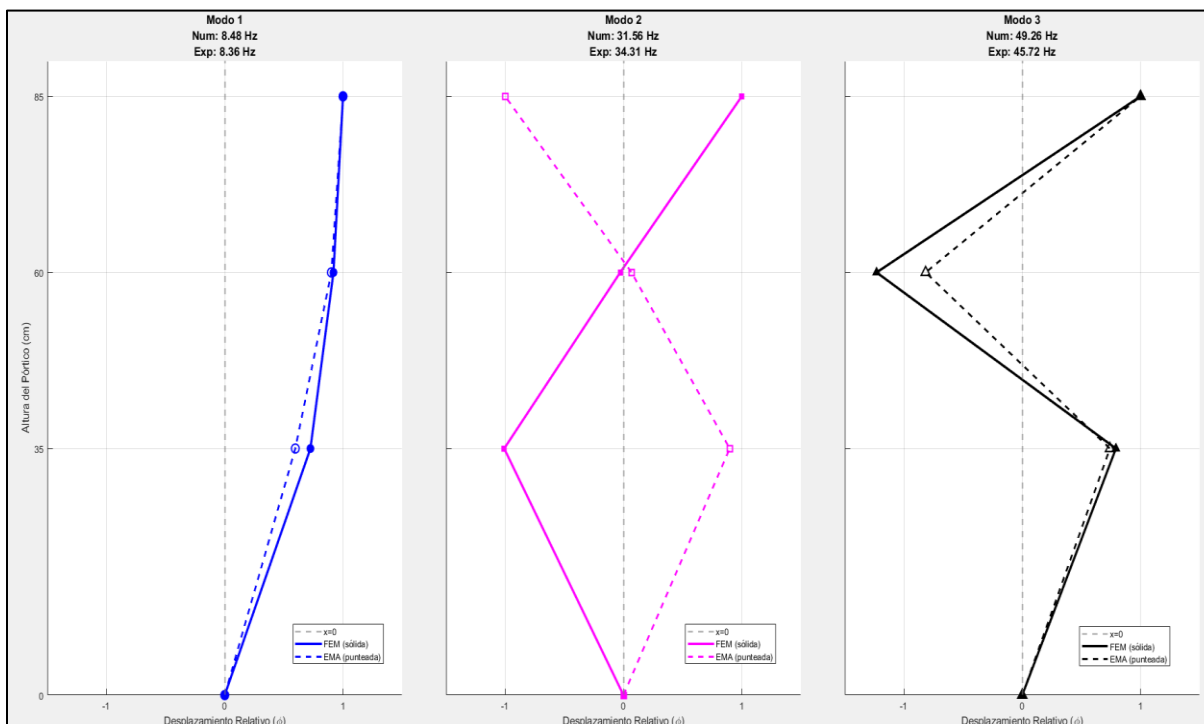
Con la finalidad de validar de manera cualitativa la precisión de los modelos, se implementó un procedimiento de comparación frente a los parámetros dinámicos obtenidos tanto del modelo experimental (EMA) y numérico (FEM).

Puesto que las amplitudes absolutas obtenidas experimentalmente dependen directamente de la magnitud de la energía de excitación aplicada, no podrían relacionarse directamente en unidades físicas con las formas modales FEM.

Por consiguiente, se aplicó un criterio de normalización en el cual el desplazamiento lateral relativo de todos los niveles se escaló respecto al desplazamiento absoluto registrado en los nodos superior.

Figura 20

Formas modales obtenidas mediante EMA (experimental) y FEM (numérico)



Nota. Se indican las formas modales del pórtico de cada método a modo comparativo.

En la figura 19 se observa la trayectoria del modelo experimental (línea punteada) en comparación con la trayectoria del modelo numérico (línea sólida), donde se evidencia que siguen con aproximada precisión la tendencia de movimiento, principalmente en los puntos de los extremos superiores ($h=85\text{cm}$), lo cual confirma la correcta modelación de empotramiento y la masa representada en los niveles superiores.

Para encontrar las formas modales de manera experimental, se ubicó en el centro de la viga/losa los sensores, y de esta manera aplicar correctamente (procesos). Igualmente, la

siguiente tabla muestra las discrepancias específicas entre las dos metodologías para el caso de las formas modales.

Tabla 18

Frecuencias naturales y experimentales obtenidas a partir del cálculo de las formas modales

Modo	Exp. (Hz)	FEM MATLAB (Hz)	Discrepancia (%)
1	8.36	8.48	1.435
2	34.31	31.56	8.015
3	45.72	49.26	7.743

Por otra parte, las desviaciones evidenciadas en los niveles intermedios son atribuibles a la rigidez no lineal del sistema relacionada con la soldadura en los nodos y la uniformidad en las láminas, que son parámetros reales propios del modelo; sin embargo, no son posibles de representar en el modelo FEM y se idealiza como conexiones y elementos perfectos.

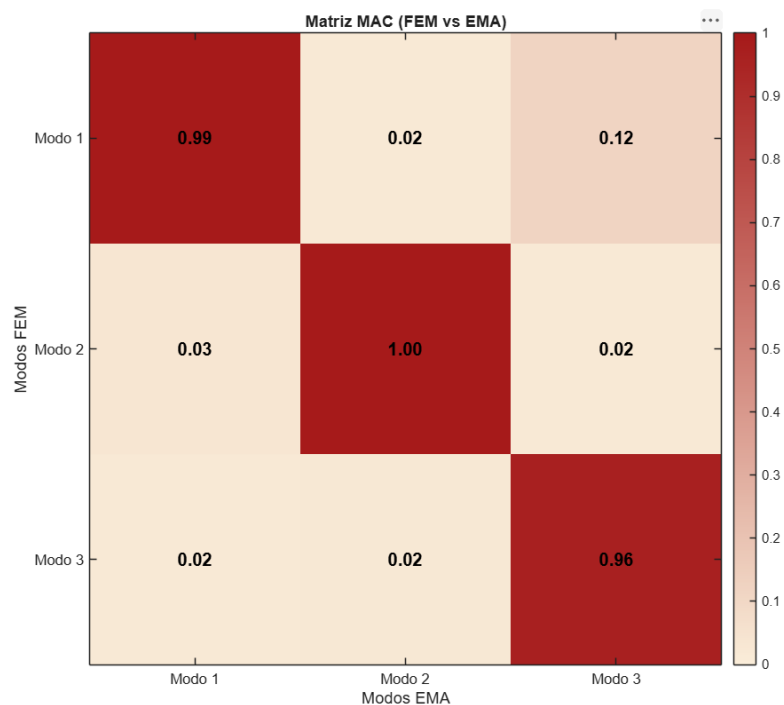
Con relación a la dirección observada en la Figura 19, específicamente para el modo 2, matemáticamente las formas modales son aquella que componen la solución a un sistema de ecuaciones homogéneo; en este sentido, si el vector (ϕ) define una forma modal, el vector con en signo opuesto $(-\phi)$ es igualmente válido y representa la misma solución física. Su dirección graficada depende puramente del esquema de normalización y el sentido numérico inicial del algoritmo que extrae los valores propios en MATLAB.

Como métrica de validación cuantitativa, se aplica el Criterio de Aseguramiento Modal (Modal Assurance Criterion o MAC, por sus siglas en ingles), mediante el cual es posible evaluar el grado de correlación lineal entre los vectores de desplazamiento numérico (ϕ_{FEM}) y experimentales (ϕ_{EMA}).

El coeficiente resultante oscila entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican una coincidencia espacial de alta confianza entre los modos de vibración, mientras que valores bajos indican independencia u ortogonalidad en los estados dinámicos. Las correlaciones obtenidas para el caso de estudio se observan en la figura 20.

Figura 21

Matriz de correlación MAC entre formas modales EMA (experimental) y FEM (numérico)



Nota. Correlación matricial de formas modales.

Como se observa en la Figura 20, la correlación de la forma modal 1 (0.99) confirma una coincidencia óptima en el modo fundamental; para la correlación de la forma modal 2 (1.00), presenta una colinealidad perfecta de ambos vectores en el espacio modal; finalmente, la correlación del modo 3 (0.96) presenta una correspondencia muy alta, la cual sobrepasa el umbral de aceptación global de la literatura estructural ($MAC > 0.90$). Esto es significativo ya que el tercer modo posee mayor complejidad geométrica y los sensores son más sensibles a pequeñas excentricidades de masa que no son cuantificables numéricamente.

7.4. Análisis Comparativo de Costos entre el Sistema de Adquisición de Datos (SAD)

Implementado y Sistemas Comerciales de Adquisición Dinámica

El desarrollo e implementación de sistemas de adquisición de datos de bajo costo ha cobrado relevancia en el campo del SHM, debido a su potencial para ampliar el acceso a tecnologías de instrumentación dinámica. De acuerdo con Ozdemir y Mutlu (2024b), los sistemas basados en sensores MEMS ofrecen ventajas importantes, como un bajo consumo energético, tamaño reducido, facilidad de integración y menor costo frente a los sistemas tradicionales; además, diversos estudios han evidenciado que estos dispositivos entregan resultados confiables y útiles para aplicaciones de ingeniería estructural.

No obstante, Komarizadehasl et al.(2022b) señalan que su implementación requiere de una evaluación con criterio, debido a limitaciones asociadas al ruido electrónico, la sincronización temporal, la resolución instrumental y la sensibilidad dinámica. Por ello, su uso resulta más apropiado en procesos de caracterización modal básica, monitoreo preliminar y

entornos de investigación; en contraste, los sistemas comerciales convencionales ofrecen mayores niveles de precisión, menor densidad de ruido y capacidades superiores de procesamiento, aunque sus costos de adquisición y mantenimiento representan una barrera para numerosos proyectos.

En este contexto, el sistema desarrollado en la presente investigación, conformado por tres nodos independientes basados en microcontroladores ESP32 y acelerómetros MEMS MPU6050, se plantea como una alternativa económicamente viable para el monitoreo estructural.

A partir de esta consideración, se presenta a continuación una comparación general entre el SAD propuesto y algunos sistemas comerciales, con el fin de identificar sus diferencias en términos de costo y alcance funcional.

Tabla 19

Comparación de tecnologías de acelerómetros empleados en SHM

Tipo de sensor	Tecnología	Ventajas	limitaciones	Aproximación de precios
		✓ Bajo costo	X Mayor ruido	
MPU6050	MEMS –	✓ Integración sencilla	X Menor sensibilidad	\$10.000 –
	capacitivo	✓ Bajo consumo	X Limitado en vibraciones pequeñas	\$20.000 COP

ADXL355	MEMS – de alta resolución	✓ Bajo ruido	X Mayor costo	
		✓ Buena respuesta	X Integración más	
		estructural	compleja	\$180.000 –
		✓ Mayor resolución	X Requiere mejor acondicionamiento	\$350.000 COP
PCB393A03	Piezoeléctrico profesional	✓ Alta	X Alto costo	
		precisión	X DAQ especializado	> \$4.000.000
		✓ Muy bajo ruido	X Menor accesibilidad	COP
		✓ Alta confiabilidad		

Aunque los sensores piezoeléctricos comerciales ofrecen mayor precisión, el MPU6050 resulta adecuado para esta investigación por su bajo costo, facilidad de integración y desempeño suficiente en estructuras a escala. Su implementación es pertinente dentro de rangos de frecuencia y amplitud compatibles con sus limitaciones instrumentales.

A continuación, se procede a desglosar la inversión material requerida para la fabricación de los nodos sensores propuestos. Este análisis de costos permite cuantificar la democratización tecnológica que representa la implementación de un SAD de bajo costo en el contexto local.

En la Tabla 17 se detallan los insumos electrónicos y materiales auxiliares adquiridos en el mercado colombiano, lo cual evidencia que la construcción de un sistema funcional para caracterización modal dinámica es posible con una fracción mínima del presupuesto exigido por la instrumentación convencional.

Tabla 20

Comparación de tecnologías de acelerómetros empleados en SHM

Componente	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Subtotal
Microcontrolador	ESP32 de 30 pines	1	\$ 35.000	\$ 35.000
	MPU6050			
Acelerómetro	(acelerómetro + giroscopio)	1	\$ 12.000	\$ 12.000
Protoboard	Mini			
	Protoboard de 400 puntos	1	\$ 10.000	\$ 10.000
Gestión de energía	Módulo fuente MB102	1	\$ 8.000	\$ 8.000
Alimentación	Batería Li-ion 18650 con	1	\$ 25.000	\$ 25.000

	Porta pila /			
	Cables			
Conectividad	Cables Jumper (HH, MM, HM)	10	\$ 500	\$ 5.000
Costo total				
	–		–	\$ 95.000
aproximado				

Nota. Los costos corresponden a la inversión ejecutada para la construcción del sensor.

Para el sistema pórtico completo de 3 nodos, el costo total de materiales asciende a \$285.000 COP, lo cual representa menos del 5% del valor de un solo canal de adquisición comercial básico.

Conclusiones

El presente estudio demostró la viabilidad de un SAD de bajo costo con sensores MEMS incorporados, al determinar de manera fidedigna las propiedades dinámicas de un pórtico metálico de acero A36 de 3GDL a escala a partir de la adquisición con alta capacidad de las señales registradas provenientes de las vibraciones inducidas, lo cual lo convierte en una alternativa válida en el SHM. Como trabajo futuro se propone implementar el sistema en estructuras a escala real, con la finalidad de determinar su comportamiento dinámico sujeto a vibraciones ambientales.

De acuerdo con la correlación de los resultados entre el modelo experimental y numérico, se concluye que el SAD es acertado en la identificación de la frecuencia natural fundamental, la cual presenta una discrepancia de 0.035%. Adicionalmente, los modos superiores presentan disparidades del 8.80% y 10.75% para el segundo y tercer modo respectivamente; estas divergencias porcentuales se consideran errores admisibles causados por errores sistemáticos o aleatorios, como se verifica en estudios experimentales de dinámica estructural expuestos en la Tabla 1.

Se determinó que el valor promedio de las razones de amortiguamiento para los Modos 1, 2 y 3 son 1.09 %, 0.43 % y 0.36 % respectivamente, magnitudes que categorizan a la estructura como subamortiguada. Estos resultados evidencian que la fracción de amortiguamiento es inversamente proporcional a las frecuencias de los modos; por ende, los mecanismos de disipación de energía son más influyentes en el modo fundamental que en los

superiores. Dichos porcentajes reducidos son coherentes en pórticos metálicos a escala presentados en la Tabla 2, debido en gran porcentaje a la simplicidad de los elementos, a sus conexiones y el rozamiento con el aire (Modos 2 y 3 más propensos). Esta mínima disipación fue identificada gracias a la notable sensibilidad y capacidad de captura del SAD.

Los resultados experimentales y numéricos de las formas modales evidenciaron una correcta concordancia. Las frecuencias naturales presentaron una elevada aproximación especialmente en el modo fundamental como se muestra en la Tabla 18, mientras que en los modos superiores las diferencias se mantuvieron dentro de rangos aceptables. Adicionalmente, los valores de la diagonal de la matriz MAC (Figura 21) sobrepasaron el 96 %, lo cual confirma la correspondencia entre las dos metodologías. Estos resultados sugieren que el SAD de bajo costo caracterizó de manera confiable las propiedades modales del pórtico.

Desde el punto de vista de la capacidad económica para la adquisición y fabricación de la instrumentación, los resultados demuestran una ventaja significativa del modelo propuesto, como se evidencia en la Tabla 18, donde se detallan los insumos para su fabricación, y en comparación con la tabla 17, que presenta algunos de los equipos comerciales, el costo total del sistema implementado representa menos de 5% de valor de sistemas comerciales; esto se traduce no solo en su facilidad de adquisición, sino en una relación costo-beneficio que la respalda como una herramienta de caracterización dinámica y monitoreo estructural.

En el proceso de calibración de los sensores y mediciones preliminares, se constató que variaciones mínimas en la masa del pórtico (debido a sensores, baterías, protoboard) generan

cambios perceptibles en las frecuencias naturales. Esto demuestra que, en modelos a escala, modificaciones en la masa afectan notablemente y de manera sensible las propiedades dinámicas de la estructura.

Durante el proceso experimental se corroboró el alcance inalámbrico del SAD (operado remotamente por el microcontrolador ESP32), con una capacidad de transferir datos vía Wi-Fi hasta 20 metros distancia en línea recta a una velocidad de 100 Hz sin presentar saltos visibles en el flujo de entrega de datos. Con este buen desempeño, se mitiga la degradación de la señal o distorsión digital en los resultados, para garantizar registros fidedignos generados por las vibraciones estructurales.

Recomendaciones

Implementación de una memoria, preferiblemente microSD, de almacenamiento funcional con el microcontrolador, lo cual garantiza el respaldo de los registros y evita cortes, saltos o pérdida de datos no observables durante la fase experimental.

Optimizar la fuente de energía a través de baterías tipo Li-Po las cuales tienen un óptimo amperaje para el funcionamiento del microcontrolador y además tienen un tamaño reducido y cómodo para el ensamblaje con los componentes del sensor.

Sustituir el uso de protoboard por un tipo de circuito impreso simplificado que presente un espesor y peso reducido, consecuencia de la alta sensibilidad de este tipo de estructuras (escala) y del sensor ante mínimos cambios de masa que distorsionan el comportamiento dinámico real.

Ampliar el rango de frecuencias en conjunto con la elección de un sensor con mejor resolución que asegure igualmente menor ruido; por lo tanto, lograr la ampliación del espectro de captura y la posterior identificación de frecuencias que no se puede identificar.

Desarrollar una interfaz web más interactiva y amigable con el usuario lo que permite mejorar la visualización y procesar los datos en tiempo real.

Ampliar la validación del sistema mediante comparación directa con instrumentación comercial de referencia y evaluar sensores MEMS de menor ruido para contrastar su influencia en la identificación de modos superiores.

Extender la metodología a estructuras con mayor complejidad geométrica y considerar el análisis más detallado del amortiguamiento y de las formas modales experimentales, con el fin de ampliar el alcance del sistema propuesto en aplicaciones de monitoreo estructural.

Referencias Bibliográficas

Alipour, A., & Zareian, F. (2008). *Study Rayleigh Damping in Structures; Uncertainties and Treatments*. 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE).

Allemang, R. J., & Brown, D. L. (2002). Experimental Modal Analysis (Capítulo 21). En C. M. Harris & A. G. Piersol (Eds.), *Harris' Shock and Vibration Handbook* (5.^a ed., pp. 21.1–21.something). McGraw–Hill.

Andrade, A. T., & Berni, W. T. (2021). Evaluation of the dynamic properties of a 2D–frame (MDOF) in a shake table. *Ingenius*, (26), 49–62.
<https://doi.org/10.17163/ings.n26.2021.05>

Arcilla Rivera, M. M., García, J., Montejo Espitia, J. S., Eraso, J. F., Valcárcel Torres, J. A., Mora Cuevas, M. G., Pagani, M., Díaz Parra, F. J., & Viganò, D. (2020). *Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia* (Vol. 42). Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake. <https://doi.org/10.32685/9789585279469> (Nota: Se unificaron las entradas idénticas 2020a y 2020b ya que correspondían al mismo documento).

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2009). *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009*. www.asosismica.org.co

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>

Avitabile, P. (2000). *Experimental Modal Analysis: A Simple Non-Mathematical Presentation*. (Nota: Al no contar con datos de editorial, se referencia como monografía o reporte independiente en cursiva).

Bacuilima Illescas, M. A., & Barbecho Chuisaca, J. (2022). Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural de Estructuras Civiles: una revisión bibliográfica. *MQRInvestigar*, 6(3), 1811–1837. <https://doi.org/10.56048/mqr20225.6.3.2022.1811-1837> (Nota: Se consolidaron las versiones duplicadas a, b, c y d en un registro único y limpio, corrigiendo la duplicación en el prefijo de la URL de su DOI).

Bathe, K.-J. (2021). *Finite Element Procedure* (2.^a ed.). Klaus-Jurgen Bathe.

Bedon, C., Bergamo, E., Izzi, M., & Noè, S. (2018). Prototyping and Validation of MEMS Accelerometers for Structural Health Monitoring—The Case Study of the Pietratagliata Cable-Stayed Bridge. *Journal of Sensor and Actuator Networks (JSAN)*, 7(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/jsan7030030>

Bono, F. M., Polinelli, A., Radicioni, L., Benedetti, L., Castelli-Dezza, F., Cinquemani, S., & Belloli, M. (2025). Wireless Accelerometer Architecture for Bridge SHM: From Sensor Design to System Deployment. *Future Internet*, 17(1), 1–29. <https://doi.org/10.3390/fi17010029>

Cabaleiro Nuñez, M. (2023). *Avances en nuevos sistemas de unión para fabricación de estructuras de acero desmontables y reconfigurables* [Tesis doctoral, UNED – Universidad Nacional de Educación a Distancia]. Portal Científico UVigo. <https://portalcientifico.uvigo.gal/documentos/64a6fdddbd2e9e48172c1e11>

Caicedo Chiriboga, D. A. (2023). Diseño eficiente de conexiones metálicas resistentes a momento y cortante en estructuras industriales. *Revista Internacional de Investigación y Desarrollo Global*, 2(1), 52–71. <https://doi.org/10.64041/riidg.v2i1.37>

Charca Morocco, H. W. (2024). *Desarrollo de una red de sensores MEMS para el monitoreo en tiempo real de salud estructural utilizando Internet de las Cosas* [Tesis de pregrado, Universidad Católica San Pablo]. Repositorio Institucional UCSP.

Chazaro Rosario, C. (2019). *Diseño de conexiones*. Gerdau Corsa.
<https://www.gerdaucorsa.com.mx/>

Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (4.^a ed.). Pearson Education.

Clough, R. W., & Penzien, J. (2003). *Dynamics of Structures*. (Nota: Al no contar con datos de editorial, se mantiene el formato de libro básico).

Cortés Osorio, J. A., Cano Garzón, H. B., & Chaves Osorio, J. A. (2008). Fundamentos y Aplicación del Muestreo en Señales Ubicadas en las Bandas Altas del Espectro. *Scientia Et Technica*, XIV(39), 37–42. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84920503008>

Cortés Pérez, J. J. (2012). *Comportamiento de estructuras ante acciones sísmicas utilizando amortiguadores viscosos como sistemas de disipación pasiva de energía* [Tesis de maestría/doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM.

Cruz Gervacio, J. L. (2023). *Monitoreo de la salud estructural de un edificio alto a través de mediciones GPS durante un periodo de 10 años* [Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM.

de Carvalho Alves, F. R. (2015). *Low-Cost Vibration Sensors: Tendencies and Applications in Condition Monitoring of Machines and Structures* [Tesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa]. Repositorio ISEL.

Di Nuzzo, F., Brunelli, D., Polonelli, T., & Benini, L. (2017). Structural Health Monitoring system with Narrowband IoT and MEMS sensors. *IEEE Sensors Journal*, (2), 1–10.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2752638> (Nota: Se removió el texto de membresía "Member, S. ").

Domínguez B., J. G., Colmenárez, L., & López, O. A. (2005). Capítulo 5: Medición y Evaluación de Propiedades Dinámicas. En *Reducción del Riesgo Sísmico en Edificaciones Escolares de Venezuela*. (Nota: Se fusionó con la entrada duplicada inferior de López, O. A.).

Døssing, O. (1988). *Structural Testing – Part II: Modal Analysis and Simulation*. Brüel & Kjær.

Duoandikoetxea, J. (2003). *Lecciones sobre las series y transformadas de Fourier*. (Nota: Formato de libro sin editorial explícita en el original).

Escobar Salguero, L. H. (2008). *Conceptos Básicos de Procesamiento Digital de Señales*.

Farrar, C. R., Doebling, S. W., & Nix, D. A. (2001). Vibration-Based Structural Damage Identification. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1778), 131–149. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0717>

Farrar, C. R., & Worden, K. (2013). *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective* (1.^a ed.). John Wiley & Sons. (Nota: Se eliminó el duplicado 2013a y 2013b).

Garita, C. (2016). Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes. *Tecnología en Marcha*, 29(1), 1–15.

Grosse, C. U., Krüger, M., & Glaser, S. D. (2006). *Wireless Acoustic Emission Sensor Networks for Structural Health Monitoring in Civil Engineering*. 9th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT).

Guerrero, E. G. (2024). *Metodología para la obtención de las propiedades dinámicas de edificios de concreto a partir de vibraciones ambientales* [Tesis, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL.

Hasani, H., Freddi, F., Piazza, R., & Ceruffi, F. (2024). A Wireless Data Acquisition System Based on MEMS Accelerometers for Operational Modal Analysis of Bridges. *Sensors*, 24(7), 1–25. <https://doi.org/10.3390/s24072121> (Nota: Se eliminó la duplicidad exacta de la segunda entrada).

Herrera Muñoz, T. I. (2018). *Monitoreo de Integridad Estructural Mediante Análisis Modal Operacional* [Tesis, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso]. Repositorio PUCV.

Ietka, I., Moutinho, C., Pereira, S., & Cunha, Á. (2023). Structural Monitoring of a Large-Span Arch Bridge Using Customized Sensors. *Sensors*, 23(13), 1–18.

<https://doi.org/10.3390/s23135971>

Iglesias, G. (2021). *Cálculo de uniones en estructura metálica. Comparación entre atornilladas y soldadas aplicadas a un pórtico estándar de una nave industrial* [Trabajo de fin de grado, Universidad de Valladolid]. Repositorio UVA.

InvenSense Inc. (2012). *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions*.

www.invensense.com

Kamble, A. A., & Pardeshi, S. A. (2018). Design and Implementation of I2C Protocol. *JournalNX – A Multidisciplinary Peer Reviewed Journal*, 4(2), 15–22.

Karbhari, V. M., & Ansari, F. (Eds.). (2009). *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*. Woodhead Publishing / CRC Press.

Klingensmith, B., Campbell, T., Feng, M. Y., Ghazi, R. M., & Buyukozturk, O. (2014). Highly Synchronized, Simultaneous, High-Speed 24-bit Data Acquisition of Triaxial MEMS Accelerometers for Monitoring a Real World Civil Structure. *2014 IEEE AUTOTESTCON*, 1–8.

Komarizadehasl, S., Huguenet, P., Lozano, F., Lozano-Galant, J. A., & Turmo, J. (2022). Operational and Analytical Modal Analysis of a Bridge Using Low-Cost Wireless Arduino-Based Accelerometers. *Sensors*, 22(24), 1–21. <https://doi.org/10.3390/s22249808>

Komarizadehasl, S., Lozano, F., Lozano-Galant, J. A., Ramos, G., & Turmo, J. (2022). Low-Cost Wireless Structural Health Monitoring of Bridges. *Sensors*, 22(15), 1–19.

<https://doi.org/10.3390/s22155725> (Nota: Se removió la duplicidad de la entrada b).

Kumar, B. R., Nikhitha, K., Manogna, P., & Kishore, B. N. (2025). Implement I2C Protocol for Secure Data Transfer Using Verilog. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 7(1), 51–59. <https://doi.org/10.47392/irjash.2025.007>

KUONGSHUN Electronic Company. (2023). AA076 MB102 Breadboard Power Supply Module 3.3V 5V. <https://www.kuongshun-ks.com>

Lajevardi, P. (2012). *Dynamic Offset Cancellation for MEMS Accelerometers* [Tesis doctoral, Stanford University]. Stanford Digital Repository. <http://purl.stanford.edu/dk850bw2227>

Lashin, M. M. A., Saleh, W. S., & Alrowais, F. (2020). Determination of Different Structures' Materials Natural Frequencies using Fuzzy Logic System. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 9(3), 2191–2196. <https://doi.org/10.35940/ijeat.B3641.029320>

Lynch, J. P., & Loh, K. J. (2006). A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. *The Shock and Vibration Digest*, 38(2), 91–128. <https://doi.org/10.1177/0583102406061499>

Maier, A., Sharp, A., & Vagapov, Y. (2017). Comparative Analysis and Practical Implementation of the ESP32 Microcontroller Module for the Internet of Things. *2017 Internet*

Technologies and Applications (ITA) – Proceedings of the 7th International Conference IEEE, 143–148. <https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926>

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2021). Anejo 26 Proyecto de estructuras de acero. En *Código Estructural (aprobado por Real Decreto 470/2021)* (pp. 1379–1505). Gobierno de España. <https://www.transportes.gob.es/>

Montes Fonseca, F. (2019). *Acelerómetros Triaxiales: Análisis de Señales y Aplicaciones Físicas*. Universidad Autónoma de Chihuahua.

Nessler, S., Bin Mansoor, M., Grumann, R., Ruf, M., Jäckle, A., Kirsch, T., Bange, S., König, S., & Rombach, S. (2024). High-Performance triaxial MEMS Accelerometer for Applications with Harsh Environmental Conditions. *International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ISA62769.2024.10786053>

Numan, H. A. (2023). Welded Connections. En *Design of Steel Structures II* (Material de curso, Lect. 12, pp. 1–18). Mustansiriyah University, Civil Engineering Department.

Oky Start. (2024). *Protoboard de 400 Puntos de Conexión*.

Ortiz Arciniega, J. L., Valencia Barahona, F. X., Bosmediano Cárdenas, C. P., Bastidas Jácome, A. D., Aguirre Chagna, V. H., & Jácome Ayala, P. J. (2025). *ESP32: Manual básico para estudiantes* (1.^a ed.). Alumni Editora. <https://doi.org/10.70625/alumned/9> (Nota: Se corrigió el prefijo duplicado en el DOI).

Özdemir, K., & Kömeç Mutlu, A. (2024). Cost-Effective Data Acquisition Systems for Advanced Structural Health Monitoring. *Sensors*, 24(13), 1–22.

<https://doi.org/10.3390/s24134269> (Nota: Se eliminó el duplicado exacto b).

Perlo Cohen, M. (2000). *Riesgo, Vulnerabilidad y Prevención de Desastres en las Grandes Ciudades*.

Quintero Parra, A. F., & Villamizar Mejía, R. (2010). Estado del arte en monitorización de salud estructural: un enfoque basado en agentes inteligentes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 117–132.

Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2014). *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: An Introduction and Guide for Applications*. Springer New York.

<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0767-0>

Ramos Domínguez, L. (2025). *Redes Inalámbricas de Sensores para Monitorizar la Salud de las Estructuras de Ingeniería Civil* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla]. Repositorio de la Universidad de Sevilla. (Nota: Se eliminó la duplicidad de la entrada b).

Restrepo, D. L., & Jaramillo, J. D. (2008). Identificación de propiedades dinámicas de estructuras considerando efectos de interacción suelo-estructura (caso de estudio). *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 8(2), 135–154.

Rocha Ribeiro, R., De Almeida Sobral, R., Cavalcante, I. B., Conte Mendes Veloso, L. A., & de Melo Lameiras, R. (2023). A Low-Cost Wireless Multinode Vibration Monitoring System for

Civil Structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 2023, 1–16.

<https://doi.org/10.1155/2023/5240059>

Rodríguez Vivanco, M. J. (2017). *Estimación de propiedades modales mediante el uso de funciones de transmisibilidad* [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio de la Universidad de Chile.

Ruiz Gómez, S. E., & Orellana Ojeda, M. A. (2021). Factores de amortiguamiento para espectros de desplazamiento de sistemas con disipadores de energía histeréticos. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (105), 31–58. <https://doi.org/10.18867/ris.105.542>

Salgado, M. A., Bernal, G. A., Yamín, L. E., & Cardona, O. D. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. *Revista de Ingeniería (Universidad de los Andes)*, (32), 128–139. <https://www.researchgate.net/publication/50247791> (Nota: Se consolidó el duplicado a y b).

Sánchez Villegas, H. S. (2024). *Análisis modal en sistemas mecánicos usando excitación tipo impacto*. Instituto Tecnológico de Pachuca.

Soto Delgado, G. B., & Vente Silva, R. A. (2021). *Título del documento/tesis* [Tesis, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <http://hdl.handle.net/10757/655017> (Nota: Deberás sustituir "Título del documento/tesis" por el nombre exacto de la obra de estos autores).

Spilsbury, M. J., & Euceda, A. (2016). Transformada Rápida de Fourier. *Revista de la Escuela de Física, UNAH*, 4(1), 45–52.

Tecpoyotl Torres, M., Vargas Chablé, P., Varona Salazar, J., Mireles Jr. García, J., Vargas Bernal, R., Javier García Ramírez, P., Leobardo Herrera May, A., & Alberto Elvira Hernández, E. (2023). *Introducción al análisis y diseño de MEMS*. Comunicación Científica / Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <https://doi.org/10.52501/cc.104> (Nota: Se corrigió el prefijo duplicado en el DOI).

Toscani, A., Rocchi, N., Pinardi, D., Binelli, M., Saccenti, L., Farina, A., Pavoni, S., & Vanali, M. (2022). Low-cost Structural Health Monitoring System for Smart Buildings. 2022 *Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART)*, 1–7. (Nota: Se removió la entrada idéntica b).

Trujillo Franco, L. G., Marin Soriano, J. C., Beltran Carbajal, F., & Abundis Fong, H. F. (2021). Identificación de parámetros modales en una estructura tipo pórtico mediante análisis modal experimental y operacional. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(1), 43–58. <https://doi.org/10.18359/rcin.5004>

Varanis, M., Silva, A. L., & Mereles, A. G. (2018). On mechanical vibration analysis of a multi degree of freedom system based on arduino and MEMS accelerometers. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40(1), Artículo e1304. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0101>

Vazquez, M., & Lopez, E. (2001). *El método de los elementos finitos aplicado al análisis estructural*. Editorial Noela.

Vélez, W., Gómez, D., & Thomson, P. (2009). Ajuste de modelos de elementos finitos. *Dyna*, 76(160), 177–189. (Nota: Se consolidaron las versiones duplicadas a y b en español e inglés en un solo registro estandarizado).

Vyas, H., Shukla, H., & Jivani, M. N. (2025). A Portable IoT-Based Health Monitoring Framework Using ESP32 for Isolated and Home-Based Patient Care. *Journal on Electronic and Automation Engineering o JEAE*, 4(2), 240–245. <https://doi.org/10.46632/jeae/4/2/31>

Welch, P. D. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70–73.
<https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>

White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Azima DLI. www.AzimaDLI.com

Wilde, K. (2008). *Modal diagnostics of civil engineering structures*. Gdansk University of Technology Publishers.

Withington, J. (2008). *A Disastrous history of the world: Chronicles of war, earthquakes, plague and flood* (L. Gonzáles de Rivera, Trad.). Turner Publicaciones. www.turnerlibros.com

Wu, Z., Long, S. R., & Peng, C.-K. (2007). On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. *Proceedings of the National Academy of Sciences*

(PNAS), 104(37), 14889–14894. www.cru.uea.ac.uk/ (Nota: Se eliminó la inicial "H. N. E."

intermedia incorrecta del autor Wu).

Anexos

Anexo 1 – Especificaciones Técnicas del IMU MPU 6050

Tabla 21

Especificaciones técnicas del IMU MPU 6050

Parámetro	Descripción	Importancia
Referencia	MPU 6050	Capturar y digitalizar la vibración del modelo.
Tecnología	MEMS (Sistemas Microelectromecánicos)	Ligereza del componente; no modifica la masa del modelo ni la respuesta dinámica.
Grados de libertad	6 (3 acelerómetro/3 giroscopio)	Capacidad de captura en la respuesta estructural multiaxial.
Resolución del ADC (Analog-to-Digital Converter)	16 bits	Alta precisión en la digitalización de señales vibratorias.
Voltaje de entrada (módulo)	3.3V – 5.0 VDC (Voltaje Direct Current)	Compatibilidad con el microcontrolador ESP32.
Voltaje de operación (chip)	2.37V – 3.46 V	Límite de voltaje; protege la funcionalidad silicio.

Interfaz de datos	I2C (hasta 400 kHz)	Transmisión digital de señales, mitiga el ruido electromagnético.
Rango de aceleración	$\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$	Sensibilidad seleccionable ante la saturación
Dimensiones físicas	19 mm x 15 mm (módulo)	Tamaño ideal, no invasivo.
	4 mm x 4 mm x 0.9 mm (chip)	

Nota. Datos tomados de MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions (2012).

Anexo 2 – Especificaciones Técnicas Placa de Desarrollo ESP32

Tabla 22

Especificaciones técnicas placa de desarrollo ESP32

Parámetro	Descripción	Importancia
Referencia	ESP32	Unidad de procesamiento y transmisión central
Procesador	Dual-core	Procesamiento simultáneo para múltiples tareas (lectura de sensor y transmisión de datos)
Velocidad de Reloj	Hasta 240 MHz	Rendimiento superior de procesamiento en tiempo real para elevada captación de datos
Conectividad	Wi-Fi (802.11 b/g/n)	Ideal para el control inalámbrico de los dispositivos
Pines GPIO	30 pines	Multifuncionalidad para el control y conexión de sensores

		Precisión elevada en la
Resolución del ADC	12 bits	digitalización de señales digitales
		Compatibilidad para la
Voltaje de operación	3.3V	conexión con sensores (MPU6050) e integración electrónica
		Canal de comunicación
Interfaz de datos	I2C (Inter-Integrated Circuit)	digital en la adquisición de datos obtenidos por el sensor

Nota. Datos tomados del manual ESP32: Manual básico para estudiantes(2025)

Anexo 3 – Código Fuente del Firmware para Microcontrolador ESP32, Nodo Sensor Nivel 1

Figura 22

Código fuente del firmware para microcontrolador ESP32, nodo sensor nivel 1

```

1  #include <Arduino.h>
2  #include <WiFi.h>
3  #include <AsyncTCP.h>
4  #include <ESPAsyncWebServer.h>
5  #include <Adafruit_MPU6050.h>
6  #include <Adafruit_Sensor.h>
7  #include <Arduino_JSON.h>
8  #include "SPIFFS.h"
9  #include <Wire.h>
10
11 // --- CONFIGURACIÓN DE RED (NODO PISO 1) ---
12 const char* ssid = "Orion";
13 const char* password = "1061778132";
14
15 IPAddress local_IP(192, 168, 80, 181); // IP Única Nivel 1
16 IPAddress gateway(192, 168, 80, 1);
17 IPAddress subnet(255, 255, 255, 0);
18
19 AsyncWebServer server(80);
20 AsyncEventSource events("/events");
21 Adafruit_MPU6050 mpu;
22
23 // --- CONFIGURACIÓN DEL TIMER POR HARDWARE ---
24 hw_timer_t * timer = NULL;
25 portMUX_TYPE timerMux = portMUX_INITIALIZER_UNLOCKED;
26 volatile bool interruptCounter = false;
27 volatile sensors_event_t a_temp, g_temp, t_temp;
28
29 void IRAM_ATTR onTimer() {
30     portENTER_CRITICAL_ISR(&timerMux);
31     interruptCounter = true;
32     portEXIT_CRITICAL_ISR(&timerMux);
33 }
34
35 void setup() {
36     Serial.begin(115200);
37     Wire.begin(21, 22);
38     Wire.setClock(400000);
39
40     if(!SPIFFS.begin(true)){
41         Serial.println("Error: No se pudo montar SPIFFS en Nivel 1");
42         return;
43     }
44
45     WiFi.config(local_IP, gateway, subnet);
46     WiFi.begin(ssid, password);
47     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { delay(500); Serial.print("."); }
48     Serial.println("\nNodo Nivel 1 Conectado.");
49

```

```

50 Wire.beginTransaction(0x68);
51 Wire.write(0x6B);
52 Wire.write(0);
53 Wire.endTransmission(true);
54 mpu.begin();
55
56 mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_2_G);
57 mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_44_HZ);
58
59 // --- CONFIGURACIÓN RELOJ DE HARDWARE A 100 Hz ---
60 timer = timerBegin(0, 80, true);
61 timerAttachInterrupt(timer, &onTimer, true);
62 timerAlarmWrite(timer, 10000, true); // 10ms exactos
63 timerAlarmEnable(timer);
64
65 server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
66   request->send(SPIFFS, "/index.html", "text/html");
67 });
68 server.serveStatic("/", SPIFFS, "/");
69
70 server.addHandler(&events);
71 server.begin();
72 Serial.println("SAD Nivel 1 Listo a 100 Hz.");
73 }
74
75 void loop() {
76   bool crearMuestra = false;
77   portENTER_CRITICAL(&timerMux);
78   if (interruptCounter) {
79     interruptCounter = false;
80     crearMuestra = true;
81   }
82   portEXIT_CRITICAL(&timerMux);
83
84   if (crearMuestra) {
85     mpu.getEvent(&a_temp, &g_temp, &t_temp);
86
87     JSONVar readings;
88     readings["t"] = String((float)millis() / 1000.0, 3);
89     readings["x"] = String(a_temp.acceleration.x, 4);
90     readings["y"] = String(a_temp.acceleration.y, 4);
91     readings["z"] = String(a_temp.acceleration.z, 4);
92
93     events.send(JSON.stringify(readings).c_str(), "accelerometer_readings", millis());
94   }
95 }

```

Anexo 4 – Código Fuente del Firmware para Microcontrolador ESP32, Nodo Sensor Nivel 2

Figura 23

Código fuente del firmware para microcontrolador ESP32, nodo sensor nivel 2

```

1  #include <Arduino.h>
2  #include <WiFi.h>
3  #include <AsyncTCP.h>
4  #include <ESPAsyncWebServer.h>
5  #include <Adafruit_MPU6050.h>
6  #include <Adafruit_Sensor.h>
7  #include <Arduino_JSON.h>
8  #include "SPIFFS.h"
9  #include <Wire.h>
10
11 // --- CONFIGURACIÓN DE RED (NODO PISO 2) ---
12 const char* ssid = "SYK_FLIA_MORAN";
13 const char* password = "nena2468";
14
15 IPAddress local_IP(192, 168, 80, 182); // IP Única Nivel 2
16 IPAddress gateway(192, 168, 80, 1);
17 IPAddress subnet(255, 255, 255, 0);
18
19 AsyncWebServer server(80);
20 AsyncEventSource events("/events");
21 Adafruit_MPU6050 mpu;
22
23 // --- CONFIGURACIÓN DEL TIMER POR HARDWARE ---
24 hw_timer_t * timer = NULL;
25 portMUX_TYPE timerMux = portMUX_INITIALIZER_UNLOCKED;
26 volatile bool interruptCounter = false;
27 volatile sensors_event_t a_temp, g_temp, t_temp;
28
29 void IRAM_ATTR onTimer() {
30     portENTER_CRITICAL_ISR(&timerMux);
31     interruptCounter = true;
32     portEXIT_CRITICAL_ISR(&timerMux);
33 }
34
35 void setup() {
36     Serial.begin(115200);
37     Wire.begin(21, 22);
38     Wire.setClock(400000);
39
40     if(!SPIFFS.begin(true)){
41         Serial.println("Error: No se pudo montar SPIFFS en Nivel 2");
42         return;
43     }
44
45     WiFi.config(local_IP, gateway, subnet);
46     WiFi.begin(ssid, password);
47     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { delay(500); Serial.print("."); }
48     Serial.println("\nNodo Nivel 2 Conectado.");
49

```

```

50 Wire.beginTransmission(0x68);
51 Wire.write(0x6B);
52 Wire.write(0);
53 Wire.endTransmission(true);
54 mpu.begin();
55
56 mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_2_G);
57 mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_44_HZ);
58
59 // --- CONFIGURACIÓN RELOJ DE HARDWARE A 100 Hz ---
60 timer = timerBegin(0, 80, true);
61 timerAttachInterrupt(timer, &onTimer, true);
62 timerAlarmWrite(timer, 10000, true); // 10ms exactos
63 timerAlarmEnable(timer);
64
65 server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
66   request->send(SPIFFS, "/index.html", "text/html");
67 });
68 server.serveStatic("/", SPIFFS, "/");
69
70 server.addHandler(&events);
71 server.begin();
72 Serial.println("SAD Nivel 2 Listo a 100 Hz.");
73 }
74
75 void loop() {
76   bool crearMuestra = false;
77   portENTER_CRITICAL(&timerMux);
78   if (interruptCounter) {
79     interruptCounter = false;
80     crearMuestra = true;
81   }
82   portEXIT_CRITICAL(&timerMux);
83
84   if (crearMuestra) {
85     mpu.getEvent(&a_temp, &g_temp, &t_temp);
86
87     JSONVar readings;
88     readings["t"] = String((float)millis() / 1000.0, 3);
89     readings["x"] = String(a_temp.acceleration.x, 4);
90     readings["y"] = String(a_temp.acceleration.y, 4);
91     readings["z"] = String(a_temp.acceleration.z, 4);
92
93     events.send(JSON.stringify(readings).c_str(), "accelerometer_readings", millis());
94   }
95 }

```


Anexo 5 – Código Fuente del Firmware para Microcontrolador ESP32, Nodo Sensor Nivel 3

Figura 24

Código fuente del firmware para microcontrolador ESP32, nodo sensor nivel 3

```

1  #include <Arduino.h>
2  #include <WiFi.h>
3  #include <AsyncTCP.h>
4  #include <ESPAsyncWebServer.h>
5  #include <Adafruit_MPU6050.h>
6  #include <Adafruit_Sensor.h>
7  #include <Arduino_JSON.h>
8  #include "SPIFFS.h"
9  #include <Wire.h>
10
11 // --- CONFIGURACIÓN DE RED (NODO PISO 3) ---
12 const char* ssid = "SYK_FLIA_MORAN";
13 const char* password = "nena2468";
14
15 IPAddress local_IP(192, 168, 80, 183); // IP Única Nivel 3
16 IPAddress gateway(192, 168, 80, 1);
17 IPAddress subnet(255, 255, 255, 0);
18
19 AsyncWebServer server(80);
20 AsyncEventSource events("/events");
21 Adafruit_MPU6050 mpu;
22
23 // --- CONFIGURACIÓN DEL TIMER POR HARDWARE ---
24 hw_timer_t * timer = NULL;
25 portMUX_TYPE timerMux = portMUX_INITIALIZER_UNLOCKED;
26 volatile bool interruptCounter = false;
27 volatile sensors_event_t a_temp, g_temp, t_temp;
28
29 void IRAM_ATTR onTimer() {
30     portENTER_CRITICAL_ISR(&timerMux);
31     interruptCounter = true;
32     portEXIT_CRITICAL_ISR(&timerMux);
33 }
34
35 void setup() {
36     Serial.begin(115200);
37     Wire.begin(21, 22);
38     Wire.setClock(400000);
39
40     if(!SPIFFS.begin(true)){
41         Serial.println("Error: No se pudo montar SPIFFS en Nivel 3");
42         return;
43     }
44
45     WiFi.config(local_IP, gateway, subnet);
46     WiFi.begin(ssid, password);
47     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { delay(500); Serial.print("."); }
48     Serial.println("\nNodo Nivel 3 Conectado.");
49

```

```

50 Wire.beginTransmission(0x68);
51 Wire.write(0x6B);
52 Wire.write(0);
53 Wire.endTransmission(true);
54 mpu.begin();
55
56 mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_2_G);
57 mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_44_HZ);
58
59 // --- CONFIGURACIÓN RELOJ DE HARDWARE A 100 Hz ---
60 timer = timerBegin(0, 80, true);
61 timerAttachInterrupt(timer, &onTimer, true);
62 timerAlarmWrite(timer, 10000, true); // 10ms exactos
63 timerAlarmEnable(timer);
64
65 server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
66 | request->send(SPIFFS, "/index.html", "text/html");
67 | });
68 server.serveStatic("/", SPIFFS, "/");
69
70 server.addHandler(&events);
71 server.begin();
72 Serial.println("SAD Nivel 3 Listo a 100 Hz.");
73 }
74
75 void loop() {
76   bool crearMuestra = false;
77   portENTER_CRITICAL(&timerMux);
78   if (interruptCounter) {
79     interruptCounter = false;
80     crearMuestra = true;
81   }
82   portEXIT_CRITICAL(&timerMux);
83
84   if (crearMuestra) {
85     mpu.getEvent(&a_temp, &g_temp, &t_temp);
86
87     JSONVar readings;
88     readings["t"] = String((float)millis() / 1000.0, 3);
89     readings["x"] = String(a_temp.acceleration.x, 4);
90     readings["y"] = String(a_temp.acceleration.y, 4);
91     readings["z"] = String(a_temp.acceleration.z, 4);
92
93     events.send(JSON.stringify(readings).c_str(), "accelerometer_readings", millis());
94   }
95 }

```

Anexo 6 – Código Fuente de la Página Web para el Control Experimental y Adquisición de Registros

Figura 25

Código fuente de la página web para el control experimental y adquisición de registros

```

1  <!DOCTYPE html>
2  <html lang="es">
3  <head>
4      <meta charset="UTF-8">
5      <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
6      <title>SAD - Control Centralizado Estructural</title>
7      <style>
8          /* CSS: Estilo Profesional para DAQ Estructural Integrado */
9          body {
10              font-family: 'Segoe UI', Tahoma, Geneva, Verdana, sans-serif;
11              background-color: #1a1a2e;
12              color: #ffffff;
13              margin: 0;
14              padding: 20px;
15              display: flex;
16              justify-content: center;
17              align-items: center;
18              min-height: 100vh;
19          }
20
21          .container {
22              width: 95%;
23              max-width: 800px;
24              text-align: center;
25          }
26
27          h1 {
28              color: #4cc9f0;
29              margin-bottom: 5px;
30              text-transform: uppercase;
31              letter-spacing: 2px;
32              font-size: 22px;
33          }
34
35          p.subtitle {
36              color: #a0aec0;
37              margin-bottom: 25px;
38              font-size: 14px;
39          }
40
41          .status-panel {
42              display: flex;
43              justify-content: space-between;
44              gap: 20px;
45              margin-bottom: 20px;
46          }
47      </style>

```

```

48 .monitor-card {
49     flex: 1;
50     background: #16213e;
51     padding: 20px;
52     border-radius: 15px;
53     box-shadow: 0 10px 30px rgba(0,0,0,0.5);
54     border: 2px solid #0f3460;
55     transition: border-color 0.3s;
56 }
57
58 /* Indicadores dinámicos de conexión */
59 .monitor-card.online { border-color: #2ecc71; }
60 .monitor-card.offline { border-color: #e63946; }
61
62 .monitor-card h3 {
63     margin-top: 0;
64     color: #4cc9f0;
65     border-bottom: 1px solid #0f3460;
66     padding-bottom: 10px;
67     font-size: 18px;
68     margin-bottom: 10px;
69 }
70
71 .ip-text {
72     font-size: 12px;
73     color: #a0aec0;
74     margin-top: -5px;
75     margin-bottom: 15px;
76 }
77
78 .node-status {
79     font-weight: bold;
80     display: block;
81     margin-bottom: 15px;
82     letter-spacing: 1px;
83     font-size: 13px;
84 }
85
86 .monitor-card p {
87     font-family: 'Courier New', Courier, monospace;
88     font-size: 1.2rem;
89     margin: 8px 0;
90     text-align: left;
91     padding-left: 15%;
92 }
93
94 span.val {
95     color: #f1c40f;
96     font-weight: bold;
97 }
98

```

```

99     .card {
100         background: #16213e;
101         padding: 25px;
102         border-radius: 15px;
103         box-shadow: 0 10px 30px rgba(0,0,0,0.5);
104         border: 1px solid #0f3460;
105     }
106
107     label {
108         display: block;
109         margin-bottom: 10px;
110         font-size: 1.1rem;
111     }
112
113     input[type="number"] {
114         background: #0f3460;
115         border: 2px solid #4cc9f0;
116         color: white;
117         padding: 10px;
118         border-radius: 5px;
119         font-size: 1.2rem;
120         width: 80px;
121         text-align: center;
122     }
123
124     .controls {
125         margin-top: 20px;
126     }
127
128     button {
129         padding: 15px 30px;
130         font-size: 1rem;
131         font-weight: bold;
132         border: none;
133         border-radius: 8px;
134         cursor: pointer;
135         transition: 0.3s;
136         margin: 0 10px;
137         text-transform: uppercase;
138     }
139
140     #startBtn {
141         background-color: #4cc9f0;
142         color: #1a1a2e;
143     }
144
145     #startBtn:hover {
146         background-color: #4895ef;
147         transform: scale(1.05);
148     }
149

```

```

150     #startBtn:disabled {
151         background-color: #555;
152         cursor: not-allowed;
153     }
154
155     #resetBtn {
156         background-color: #e63946;
157         color: white;
158     }
159
160     #resetBtn:hover {
161         background-color: #a82a33;
162     }
163
164     #counter {
165         margin-top: 20px;
166         font-size: 1.5rem;
167         color: #f1c40f;
168         font-weight: bold;
169     }
170
171     #status {
172         margin-top: 15px;
173         font-weight: bold;
174         letter-spacing: 1px;
175     }
176 </style>
177 </head>
178 <body>
179
180 <div class="container">
181     <h1>Sistema de Adquisición de Datos (SAD)</h1>
182     <p class="subtitle">Monitoreo Estructural Remoto de Aceleraciones - Multinodo Inalámbrico</p>
183
184     <div class="status-panel">
185         <div id="nodeCard1" class="monitor-card offline">
186             <h3>Sensor Nivel 1 (35 cm)</h3>
187             <div class="ip-text">IP: 192.168.80.181</div>
188             <span id="nodeStatus1" class="node-status" style="color: #e63946;">DESCONECTADO</span>
189             <p>Eje X: <span id="xVal1" class="val">0.0000</span> m/s2</p>
190             <p>Eje Y: <span id="yVal1" class="val">0.0000</span> m/s2</p>
191             <p>Eje Z: <span id="zVal1" class="val">0.0000</span> m/s2</p>
192         </div>
193
194         <div id="nodeCard2" class="monitor-card offline">
195             <h3>Sensor Nivel 3 (85 cm)</h3>
196             <div class="ip-text">IP: 192.168.80.183</div>
197             <span id="nodeStatus2" class="node-status" style="color: #e63946;">DESCONECTADO</span>
198             <p>Eje X: <span id="xVal2" class="val">0.0000</span> m/s2</p>
199             <p>Eje Y: <span id="yVal2" class="val">0.0000</span> m/s2</p>
200             <p>Eje Z: <span id="zVal2" class="val">0.0000</span> m/s2</p>
201         </div>
202     </div>

```

```

203
204 <div class="card">
205   <label for="durationInput">DURACIÓN DEL ENSAYO EXPERIMENTAL (SEGUNDOS):</label>
206   <input type="number" id="durationInput" value="60" min="5">
207
208   <div class="controls">
209     <button id="startBtn" onclick="startCapture()">Iniciar Ensayo</button>
210     <button id="resetBtn" onclick="resetSystem()">Reiniciar</button>
211   </div>
212
213   <div id="counter">Tiempo restante: 0 s</div>
214   <div id="status" style="color: █ #cbd5e1;">ESTADO: SISTEMA LISTO</div>
215 </div>
216 </div>
217
218 <script>
219   // LÓGICA DE ACTUALIZACIÓN Y ADQUISICIÓN CENTRALIZADA
220   const ipNodo1 = "http://192.168.80.181";
221   const ipNodo2 = "http://192.168.80.183";
222
223   let recording = false;
224   let startTime;
225   let dataRowsNode1 = [];
226   let dataRowsNode2 = [];
227   let timer;
228   let source1 = null;
229   let source2 = null;
230
231   // Encabezados exactos requeridos para procesar en MATLAB
232   const csvHeader = "Time (s),Acceleration x (m/s^2),Acceleration y (m/s^2),Acceleration z (m/s^2)";
233
234   // Rutina de diagnóstico continuo de red (Ping cada 3 segundos)
235   async function verificarConexiones() {
236     if (recording) return; // Pausar pings durante la adquisición para liberar ancho de banda
237
238     // Diagnóstico Nodo 1
239     try {
240       let res1 = await fetch(`${ipNodo1}/ping`, { mode: 'cors' });
241       if(res1.ok) {
242         document.getElementById("nodeCard1").className = "monitor-card online";
243         document.getElementById("nodeStatus1").innerText = "ONLINE (CONECTADO)";
244         document.getElementById("nodeStatus1").style.color = "#2ecc71";
245       }
246     } catch(e) {
247       document.getElementById("nodeCard1").className = "monitor-card offline";
248       document.getElementById("nodeStatus1").innerText = "DESCONECTADO";
249       document.getElementById("nodeStatus1").style.color = "#e63946";
250     }
251

```

```

252 // Diagnóstico Nodo 2
253 try {
254     let res2 = await fetch(`${ipNodo2}/ping`, { mode: 'cors' });
255     if(res2.ok) {
256         document.getElementById("nodeCard2").className = "monitor-card online";
257         document.getElementById("nodeStatus2").innerText = "ONLINE (CONECTADO)";
258         document.getElementById("nodeStatus2").style.color = "#2ecc71";
259     }
260 } catch(e) {
261     document.getElementById("nodeCard2").className = "monitor-card offline";
262     document.getElementById("nodeStatus2").innerText = "DESCONECTADO";
263     document.getElementById("nodeStatus2").style.color = "#e63946";
264 }
265 }
266
267 setInterval(verificarConexiones, 3000);
268 verificarConexiones();
269
270 // Función de Disparo Simultáneo de Captura
271 function startCapture() {
272     const duration = parseInt(document.getElementById("durationInput").value);
273
274     // Inicializar arreglos de almacenamiento con el encabezado estructurado
275     dataRowsNode1 = [csvHeader];
276     dataRowsNode2 = [csvHeader];
277
278     recording = true;
279     startTime = Date.now();
280
281     // Restringir controles para proteger la integridad del ensayo
282     document.getElementById("startBtn").disabled = true;
283     document.getElementById("durationInput").disabled = true;
284     document.getElementById("status").innerText = "ESTADO: CAPTURANDO DATOS SIMULTÁNEOS...";
285     document.getElementById("status").style.color = "#e63946";
286
287     let remaining = duration;
288     document.getElementById("counter").innerText = `Tiempo restante: ${remaining} s`;
289
290     // Abrir canales Server-Sent Events (SSE) en paralelo hacia ambos ESP32
291     source1 = new EventSource(`${ipNodo1}/events`);
292     source2 = new EventSource(`${ipNodo2}/events`);
293
294     // Escucha y mapeo de datos: Sensor Nivel 1
295     source1.addEventListener('accelerometer_readings', (e) => {
296         const data = JSON.parse(e.data);
297         document.getElementById("xVal1").innerText = data.x;
298         document.getElementById("yVal1").innerText = data.y;
299         document.getElementById("zVal1").innerText = data.z;
300
301         if (recording) {
302             const now = (Date.now() - startTime) / 1000;
303             dataRowsNode1.push(`${now.toFixed(4)},${data.x},${data.y},${data.z}`);
304         }
305     });
306

```



```

307 // Escucha y mapeo de datos: Sensor Nivel 3
308 source2.addEventListener('accelerometer_readings', (e) => {
309     const data = JSON.parse(e.data);
310     document.getElementById("xVal2").innerText = data.x;
311     document.getElementById("yVal2").innerText = data.y;
312     document.getElementById("zVal2").innerText = data.z;
313
314     if (recording) {
315         const now = (Date.now() - startTime) / 1000;
316         dataRowsNode2.push(`${now.toFixed(4)},${data.x},${data.y},${data.z}`);
317     }
318 });
319
320 // Control del reloj del ensayo
321 timer = setInterval(() => {
322     remaining--;
323     document.getElementById("counter").innerText = `Tiempo restante: ${remaining} s`;
324     if (remaining <= 0) stopCapture();
325 }, 1000);
326 }
327
328 // Cierre controlado de flujos inalámbricos
329 function stopCapture() {
330     recording = false;
331     clearInterval(timer);
332
333     // Cerrar conexiones asíncronas de inmediato
334     if (source1) source1.close();
335     if (source2) source2.close();
336
337     document.getElementById("startBtn").disabled = false;
338     document.getElementById("durationInput").disabled = false;
339     document.getElementById("status").innerText = "ESTADO: TOMA FINALIZADA CON ÉXITO";
340     document.getElementById("status").style.color = "#2ecc71";
341
342     // Disparar las descargas consecutivas de los archivos brutos
343     downloadCSV(dataRowsNode1, `Sensor_Nivel1_${Date.now()}.csv`);
344     downloadCSV(dataRowsNode2, `Sensor_Nivel3_${Date.now()}.csv`);
345 }
346
347 // Descargador automático por inyección de blobs
348 function downloadCSV(rowsArray, fileName) {
349     const blob = new Blob([rowsArray.join("\n")], { type: 'text/csv' });
350     const url = window.URL.createObjectURL(blob);
351     const a = document.createElement('a');
352     a.href = url;
353     a.download = fileName;
354     document.body.appendChild(a);
355     a.click();
356     document.body.removeChild(a);
357 }
358
359 function resetSystem() {
360     location.reload();
361 }
362 </script>
363
364 </body>
365 </html>

```

Anexo 7 – Código Fuente para el Procesamiento de Señales y Cálculo de las Propiedades Dinámicas por El Método de Welch en MATLAB

Figura 26

Código fuente para el procesamiento de señales y cálculo de las propiedades dinámicas por el método de Welch en MATLAB

```
clear all; clc; close all;

%% 1. CONFIGURACIÓN Y ACQUISICIÓN
[archivo, ruta] = uigetfile('*.txt', 'Selecciona tu archivo de datos');
data = readtable(fullfile(ruta, archivo), 'Delimiter', ',', 'VariableNamingRule', 'preserve');

t_raw = data(:, 1);
acc_raw_all = data(:, 3); % Asegúrate de que esta sea tu columna de aceleración

[t, unique_idx] = unique(t_raw, 'first');
acc_raw = acc_raw_all(unique_idx);
fs = 1 / mean(diff(t));

%% 2. ACONDICIONAMIENTO
acc_detrend = acc_raw - mean(acc_raw);
f_max = min(47, floor(fs / 2) - 2);
[b, a_coeff] = butter(4, [0.5 f_max] / (fs / 2), 'bandpass');
acc_filtered = filtfilt(b, a_coeff, acc_detrend);

%% 3. TRANSFORMADA Y PSD
segmentos = 8;
L = floor(length(acc_filtered) / segmentos);
D = floor(L / 2);
nfft = 16384;
ventana = blackmanharris(L);
[psd, f] = pwelch(acc_filtered, ventana, D, nfft, fs);

%% 4. IDENTIFICACIÓN Y CÁLCULO DE AMORTIGUAMIENTO (PARA CADA MODO)
distancia_minima_hz = 2.0;
prominencia_minima = max(psd) * 0.0001;

[pks, locs] = findpeaks(psd, f, 'MinPeakDistance', distancia_minima_hz, 'MinPeakProminence', prominencia_minima, 'SortStr', 'descend');

num_modos = min(3, length(pks));
f_modos = sort(locs(1:num_modos));

% Re-ordenar potencias según frecuencias
[~, idx_order] = sort(locs(1:num_modos));
psd_modos = pks(idx_order);

zeta_modos = zeros(num_modos, 1);

fprintf('\n--- REPORTE DETALLADO DE MODOS ---\n');
fprintf('%-10s | %-15s | %-20s\n', 'Modo', 'Freq (Hz)', 'Amortiguamiento (ζ)');
fprintf('-----\n');

for i = 1:num_modos
    fn = f_modos(i);
    peak_val = psd_modos(i);
    target = peak_val / 2;
```

```

    [~, idx_peak] = min(abs(f - fn));
    idx_left = idx_peak;
    while idx_left > 1 && psd(idx_left) > target, idx_left = idx_left - 1; end
    idx_right = idx_peak;
    while idx_right < length(psd) && psd(idx_right) > target, idx_right = idx_right + 1; end

    f1 = f(idx_left); f2 = f(idx_right);
    zeta_modos(i) = (f2 - f1) / (2 * fn);

    fprintf('Modo %d | %.4f Hz | %.4f (%.2f%%)\n', i, fn, zeta_modos(i),
zeta_modos(i)*100);
end

%% 5. VISUALIZACIÓN
figure('Name', 'SAD - Análisis Estructural', 'Color', 'w');

% Subplot 1: Señal en el tiempo
subplot(2,1,1);
plot(t, acc_filtered, 'Color', [0 0.447 0.741]);
title('Señal en el Tiempo', 'FontWeight', 'bold');
xlabel('Tiempo (s)'); ylabel('Aceleración (m/s²)');
grid on;

% Subplot 2: PSD con leyendas dinámicas
subplot(2,1,2);
h_psd = semilogy(f, psd, 'Color', [0.6 0.6 0.6], 'LineWidth', 1.0); hold on;

colores = [0 0.6 0; 0.9 0.5 0; 0.6 0 0.6];
h_plots = zeros(num_modos, 1); % Vector para almacenar los handles de los gráficos
leyendas = cell(num_modos + 1, 1); % Celda para los textos de la leyenda
leyendas{1} = 'Espectro PSD';

for i = 1:num_modos
    % Graficar marcador y guardar el handle
    h_plots(i) = plot(f_modos(i), psd_modos(i), 'o', ...
        'MarkerFaceColor', colores(i,:), ...
        'MarkerEdgeColor', 'k', ...
        'MarkerSize', 8);

    % Crear texto formateado para la leyenda de cada modo
    leyendas{i+1} = sprintf('Modo %d: %.2f Hz (zeta = %.2f%%)', i, f_modos(i),
zeta_modos(i)*100);
end

title('Espectro (PSD) con identificación de Modos', 'FontWeight', 'bold');
xlabel('Frecuencia (Hz)'); ylabel('Potencia (g²/Hz)');
grid on;

% Renderizar la leyenda incluyendo la PSD y los modos identificados
legend([h_psd; h_plots], leyendas, 'Location', 'best');
```

Anexo 8 – Código Fuente para el Procesamiento de Señales y Cálculo de las Formas

Modales en MATLAB

Figura 27

Código fuente para el procesamiento de señales y cálculo de las formas modales en MATLAB

```

clc; clear; close all;

alturas = [0; 35; 60; 85]; % Alturas en cm (Base, Piso 1, Piso 2, Piso 3)

file1 = 'Sincronizado_Piso1.txt';
file2 = 'Sincronizado_Piso2.txt';
file3 = 'Sincronizado_Piso3.txt';

if ~exist(file1,'file') || ~exist(file2,'file') || ~exist(file3,'file')
    error('Asegúrate de que los tres archivos Sincronizado_PisoX.txt estén en la
carpeta actual.');
```

end

```

data1 = readmatrix(file1); t_raw = data1(:,1); acc1_raw = data1(:,2);
data2 = readmatrix(file2);          acc2_raw = data2(:,2);
data3 = readmatrix(file3);          acc3_raw = data3(:,2);

min_len = min([length(acc1_raw), length(acc2_raw), length(acc3_raw)]);

t      = t_raw(1:min_len);
acc1_raw = acc1_raw(1:min_len);
acc2_raw = acc2_raw(1:min_len);
acc3_raw = acc3_raw(1:min_len);

dt = t(2) - t(1);
Fs = 1/dt;
N = length(t);

acc1_detrend = detrend(acc1_raw, 'constant');
acc2_detrend = detrend(acc2_raw, 'constant');
acc3_detrend = detrend(acc3_raw, 'constant');

ventana = hanning(N);
acc1_win = acc1_detrend .* ventana;
acc2_win = acc2_detrend .* ventana;
acc3_win = acc3_detrend .* ventana;

Y1 = fft(acc1_win); Y2 = fft(acc2_win); Y3 = fft(acc3_win);

half_idx = 1:floor(N/2)+1;
f_plot = (0:N-1)*(Fs/N);
f_plot = f_plot(half_idx);

Mag1 = abs(Y1(half_idx));
Mag2 = abs(Y2(half_idx));
Mag3 = abs(Y3(half_idx));

[~, locs] = findpeaks(Mag3, 'MinPeakDistance', 10, 'SortStr', 'descend', 'NPeaks', 3);
locs_ordenados = sort(locs);
```

```

f_modos = f_plot(locs_ordenados);

signos_teoricos = [ 1, -1, 1;
                   1, -1, -1;
                   1, 1, 1];

Phi = zeros(4, 3);

for k = 1:3
    idx = locs_ordenados(k);

    phi_cruda = [signos_teoricos(1, k) * Mag1(idx); ...
                 signos_teoricos(2, k) * Mag2(idx); ...
                 signos_teoricos(3, k) * Mag3(idx)];

    Phi(2:4, k) = phi_cruda / phi_cruda(3);
end

fprintf('\n===== FORMAS MODALES NORMALIZADAS (CORREGIDAS)✓\n\n');
for k = 1:3
    fprintf('\nModo %d (Frecuencia Natural: %6.2f Hz):\n', k, f_modos(k));
    fprintf(' Piso 3 (85 cm): %6.4f\n', Phi(4,k));
    fprintf(' Piso 2 (60 cm): %6.4f\n', Phi(3,k));
    fprintf(' Piso 1 (35 cm): %6.4f\n', Phi(2,k));
    fprintf(' Base (0 cm) : %6.4f\n', Phi(1,k));
end
fprintf('✓\n\n');

figure('Name', 'Formas Modales Experimentales Ajustadas', 'NumberTitle', 'off');

colores = {'b', 'm', 'k'};
marcadores = {'o', 's', '^'};

for k = 1:3
    subplot(1, 3, k);

    plot(zeros(4,1), alturas, '--', 'Color', [0.5 0.5 0.5], 'LineWidth', 1.5);
    hold on;

    plot(Phi(:,k), alturas, [marcadores(k), '-'], 'Color', colores(k), 'LineWidth', 2.5, ...
         'MarkerFaceColor', colores(k), 'MarkerSize', 8);

    title(sprintf('Modo %d\nFrec: %.2f Hz', k, f_modos(k)));
    xlabel('Desplazamiento Relativo (\phi)');

    if k == 1
        ylabel('Altura del Pórtico (cm)');
    end

    grid on;
    xlim([-1.5, 1.5]);
    ylim([-5, 95]);
    set(gca, 'YTick', alturas);

    hold off;
end

```

Glosarios de Términos Especiales

En este glosario se reúnen los términos técnicos y abreviaturas más relevantes empleados en el desarrollo del trabajo, con el propósito de facilitar su consulta y comprensión dentro del contexto del monitoreo de salud estructural, el análisis dinámico y la instrumentación electrónica de bajo costo.

Monitoreo de Salud Estructural (SHM): Proceso de observación, medición y evaluación del estado de una estructura mediante sensores, registros y métodos de análisis que permiten identificar cambios en su comportamiento dinámico y apoyar la toma de decisiones sobre su seguridad y operatividad.

Sistema de Adquisición de Datos (SAD): Conjunto de componentes de hardware y software encargado de captar, convertir, transmitir, almacenar y organizar señales provenientes de sensores para su posterior procesamiento y análisis.

Sistemas Microelectromecánicos (MEMS): Dispositivos miniaturizados que integran componentes mecánicos y electrónicos en una misma arquitectura. En este trabajo, se emplean como sensores capaces de medir aceleraciones y vibraciones estructurales.

Tres Grados de Libertad (3GDL): Condición de un sistema estructural en la que su movimiento puede describirse mediante tres coordenadas independientes. En el pórtico a escala, corresponde al desplazamiento lateral de cada uno de los tres niveles.

Análisis Modal Experimental (EMA): Técnica utilizada para identificar las propiedades dinámicas de una estructura a partir de registros experimentales de vibración (impacto inducido), tales como frecuencias naturales, formas modales y amortiguamiento.

Frecuencia natural: Frecuencia propia a la cual una estructura tiende a vibrar cuando es perturbada y luego se deja oscilar libremente.

Razón de amortiguamiento: Parámetro adimensional que cuantifica la capacidad de un sistema para disipar energía durante la vibración. Describe qué tan rápido disminuye la amplitud del movimiento con el tiempo.

Formas modales: Patrones característicos de deformación que adopta una estructura cuando vibra en una de sus frecuencias naturales. Permiten comprender cómo se distribuye el movimiento en sus distintos niveles o elementos.

MPU6050: Unidad de medición inercial (IMU) basada en tecnología MEMS que integra acelerómetro triaxial y giroscopio. Se utiliza para registrar aceleraciones en los tres ejes espaciales.

ESP32: Microcontrolador de bajo costo con capacidad de procesamiento, conectividad Wi-Fi y Bluetooth, empleado para leer sensores, procesar datos y transmitirlos de manera inalámbrica.

I2C (Inter-Integrated Circuit): Protocolo de comunicación serial que permite el intercambio de datos entre dispositivos electrónicos mediante dos líneas principales: datos (SDA) y reloj (SCL).

Transformada Rápida de Fourier (FFT): Algoritmo matemático que permite transformar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, facilitando la identificación de componentes vibracionales predominantes.

Método de Welch: Técnica de estimación espectral que divide una señal en segmentos, aplica ventanas y promedia los periodogramas obtenidos para calcular una densidad espectral de potencia más estable y menos sensible al ruido.

Densidad Espectral de Potencia (PSD): Representación de la distribución de la energía o potencia de una señal en función de la frecuencia. Se utiliza para identificar las frecuencias dominantes de vibración.

Teorema de Nyquist–Shannon: Principio que establece que una señal puede reconstruirse adecuadamente si la frecuencia de muestreo es al menos el doble de la frecuencia máxima presente en la señal.

Aliasing: Distorsión que ocurre cuando una señal se muestrea con una frecuencia insuficiente, provocando que componentes de alta frecuencia aparezcan falsamente como frecuencias menores en el análisis.

Detrending: Proceso de eliminación de tendencias o componentes constantes de una señal para centrarla alrededor de cero y facilitar un análisis dinámico más representativo.

Filtro digital Butterworth: Tipo de filtro de procesamiento de señales diseñado para atenuar frecuencias no deseadas con una respuesta suave y uniforme en la banda de paso, útil para reducir ruido en registros experimentales.

Método de Elementos Finitos (FEM): Procedimiento numérico que divide una estructura en elementos más pequeños para modelar su comportamiento mecánico y dinámico mediante ecuaciones matriciales de rigidez, masa y amortiguamiento.

Internet de las Cosas (IoT): Enfoque tecnológico en el que dispositivos físicos con sensores y conectividad intercambian datos a través de redes para permitir monitoreo, control y análisis en tiempo real.