

Construcción e instrumentación de un edificio a escala pequeña para simulación de sismos por medio de modelos matemáticos



Colaboración

Irving Naim Rodríguez Barragán; Antonio Concha Sánchez, Universidad de Colima, Colima

Fecha de recepción: 18 de septiembre 2025

Fecha de aceptación: 13 de septiembre de 2025

RESUMEN: Se presenta el diseño, construcción, instrumentación y análisis de un edificio a escala reducida para su estudio en una mesa vibratoria de pruebas sísmicas. La estructura se modela en AutoCAD, cuenta con pisos de madera, columnas de aluminio, masas de acero y está instrumentada con sensores MPU-6050 (acelerómetro-giroscopio) conectados a una Raspberry Pi 3. Esto conlleva a un prototipo de bajo costo, con escalabilidad modular, alta repetibilidad y fines académicos a diferencia de los que suelen ser con el objetivo de investigación. La tarjeta Raspberry permite la adquisición de 30 lecturas por segundo, lo que posibilita graficar la aceleración y el desplazamiento de ambos pisos del edificio en tiempo real. Además, la Raspberry almacena los datos en un archivo CSV para su posterior análisis. Se calcula la rigidez, así como las propiedades dinámicas del edificio, para su estudio experimental realizado en una mesa vibratoria simulando el terremoto de Northridge del año 1994. La estructura es efectiva para analizar el comportamiento ante excitaciones dinámicas que simulan sismos, validando el modelo matemático mediante pruebas experimentales controladas.

PALABRAS CLAVE: Edificio reducido, acelerómetro, MPU-6050, rigidez estructural, Raspberry Pi 3.

ABSTRACT: This paper presents the design, construction, instrumentation, and analysis of a small-scale building for seismic testing on a shake table. The structure is modeled in AutoCAD and features wooden floors, aluminum columns, steel masses, and MPU-6050 sensors (accelerometer-gyroscope) connected to a Raspberry Pi 3. This results in a prototype with a low cost, modular scalability, high repeatability and academic purposes, unlike those that are usually for research purposes. The Raspberry board allows data acquisition at 30 readings per second, enabling real-time plotting of acceleration and displacement for both floors of the building. Additionally, the Raspberry Pi stores the data in a CSV file for further analysis. The stiffness and dynamic properties of the building are calculated for experimental study made in a shake table simulating the 1994 Northridge earthquake. The structure is effective for analyzing behavior under dynamic excitations simulating earthquakes, validating the mathematical model through controlled experimental testing.

KEYWORDS: scaled building, accelerometer, MPU-6050, structural stiffness, Raspberry Pi 3.

INTRODUCCIÓN

Los terremotos a lo largo de la historia se han caracterizado por su poder destructivo y por ser impredecibles. En la actualidad no se cuenta con tecnología que permita anticipar uno de estos eventos, por lo que se desconoce dónde puede ocurrir uno, cuando y su magnitud. De los registros que se tienen de los últimos 100 años, el de mayor magnitud fue el de Valdivia, Chile (1960) con una duración de 10 minutos y 9.5 grados de magnitud en la escala Richter, publicado por la revista Muy interesante [1].

De acuerdo con Espíndola [2], los sismos se originan por movimiento, fricción y deformación de las placas tectónicas. En la superficie o en el interior de la Tierra se generan perturbaciones que viajan y son adquiridas por los sismógrafos. Los primeros sismógrafos fueron ideados a finales del siglo XIX, siendo registrados en una hoja de papel en movimiento con una plumilla que inscribía el movimiento como se muestra en la Figura 1, posteriormente, se actualizó a los sismogramas digitales.

Un edificio que vibra está definido por su masa, amortiguamiento y rigidez. Esto ha sido de interés en las últimas décadas, debido a que permite determinar las propiedades dinámicas de la estructura, tal como sus frecuencias naturales y también su respuesta a excitaciones, como terremotos [3].

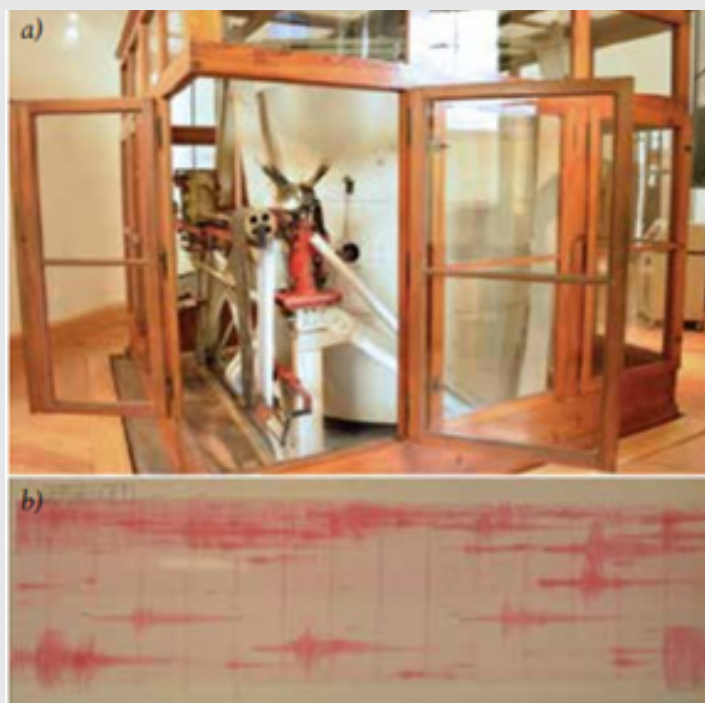


Figura 1. a) Sismógrafo horizontal, se encuentra en el museo de Geofísica de la UNAM.

Fuente: Recuperada de [2].

En el trabajo de Concha [3], se desarrolla el modelo matemático de un edificio torsional experimental a escala reducida, validando el comportamiento dinámico mediante pruebas con una mesa vibratoria. Se realiza un análisis comparativo entre los resultados teóricos (simulaciones) y experimentales, con el fin de optimizar una estrategia de control de vibraciones del edificio.

Como menciona Martínez [4], para el modelado matemático es clave describir lo más exacto posible los parámetros del edificio reducido. Con ello es posible obtener las ecuaciones que permitan simular el comportamiento dinámico, utilizando una señal sísmica como excitación.

Dentro del laboratorio de Control de Vibraciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se encuentra una estructura para investigaciones que utiliza amortiguadores magnetoreológicos en la atenuación de las vibraciones inducidas en edificios por sismos. Esta estructura cuenta con motores lineales, sensores de desplazamiento LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 0356 de Transtek, Acelerómetros US5 de CFX Technologies, centro de comando y una interfaz conectada a los sensores para su monitoreo [5].

El trabajo realizado por Guégen et al. [6] analiza la respuesta torsional de un edificio de concreto reforzado mediante la comparación de las rotaciones de acelerómetros triaxiales y las obtenidas directamente mediante el sensor rotacional BlueSeis-3A, el cual es un giroscopio óptico de alta sensibilidad. El trabajo resalta la precisión que tienen estos sensores rotacionales dedicados a la captura de modos torsionales, pero tienen un costo elevado al ser especializados y con requerimientos específicos.

Por otro lado, la investigación de Kurzych et al. [7] presenta un estudio experimental de un sensor rotacional basado en fibra óptica (FORSEM), el cual mide directamente la rotación alrededor del eje vertical en estructuras de laboratorio. El dispositivo es compacto (0.36 m x 0.36 m x 0.16), autónomo y permite control vía internet. Los sensores FORSEM son una alternativa con características similares al BlueSeis-3A, ofreciendo una precisión rotacional cercana, con un costo estimado entre US 3,500 y US \$5,900, el precio exacto del sensor BlueSeis-3A no se encuentra públicamente disponible y puede variar dependiendo de las configuraciones y aplicaciones requeridas.

El objetivo de este trabajo es proponer el diseño, construcción e instrumentación de un edificio reducido, implementando una técnica de adquisición de datos de bajo costo, como se muestra en la Tabla 1, basada en una Raspberry Pi 3, la cual logra almacenar los datos de dos módulos MPU 6050 para adquirir la posición y aceleración de los pisos en formato CSV para su posterior análisis. Mediante el uso de una mesa vibratoria de dos ejes ("X" y "Y"), se excita la estructura reducida simulando un sismo, permitiendo adquirir los datos de los sensores durante la prueba. A diferencia de la estructura de la UNAM [5], la propuesta no requiere software comercial para la adquisición de datos de los sensores, es portable, y es accesible para regiones con recursos limitados de laboratorio.

El resto del artículo se organiza como sigue: la sección 2 presenta el modelado en 3D detallado del edificio reducido, su instrumentación con módulos MPU-6050, así como su modelo matemático, cálculo de rigideces, frecuencias naturales y factores de

participación. La sección 3 describe la prueba experimental realizada, se muestran los gráficos de las señales: sísmica y aceleración y desplazamiento de la estructura y de la transformada rápida de Fourier de cada piso. Finalmente, las conclusiones resaltan la validez experimental del modelo propuesto.

Tabla 1. Ítems seleccionados de PRISMA 2020.

Características	MPU-6050	BlueSeis-3A (Guégen et al.)	FORSEM (Kurzych et al.)
Tipo de sensor	MEMS 6DOF (acelerómetro + giroscopio)	Giroscopio de fibra óptica (FOG), rotacional puro	Giroscopio de fibra óptica (FOG, tipo Sagnac)
Precisión	$\sim 0.061^\circ/\text{s}$ (con escala $\pm 250^\circ/\text{s}$)	$\sim 10\text{--}7\text{ rad/s}$ (estimado por el fabricante)	$2\cdot 10^{-8}\text{ rad/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ (teórica)
Software	Librerías I2C	Software especializado de análisis sísmico	Software dedicado, interfaz remota vía internet
Costo	$\sim 6\text{--}7\text{ USD}$	$> 10\,000\text{ U SD}$	No comercial, prototipo de investigación.
Aplicación	Prototipos, proyectos académicos	Monitoreo Torsional en edificios reales	Laboratorio de investigación estructural torsional

Fuente: Elaboración propia.

Modelado del Edificio

Diseño 3D

En la etapa inicial del modelado 3D del edificio, se definieron las condiciones mecánicas y electrónicas para lograr el funcionamiento deseado de la estructura para la simulación de un sismo. El modelado del edificio reducido se realizó en el programa de diseño AutoCAD. Este software cuenta con precisión al diseñar, lo que facilita la creación de modelos exactos. También, cuenta con herramientas que simplifican la generación de planos para su fabricación. Primeramente, se modeló cada una de las piezas con las que cuenta el prototipo para realizar un ensamblaje digital, y posteriormente se fabricaron cada una de las partes.

La estructura cuenta con 2 pisos, los cuales tienen 4 columnas. Cada piso es de madera cuyas dimensiones son 250 mm de largo, 120 mm de ancho y un espesor de 10 mm. Las columnas son de aluminio con una altura de 300 mm, 19 mm de ancho y un espesor de 1.4 mm. La sujeción de las columnas al nivel es mecánica con tornillos de 5/16" de diámetro a una escuadra de metal que mantiene toda la estructura unida, como se observa en la Figura 2.

El material utilizado para la construcción de dicha estructura es reciclado, ya que se encontraba dentro del Taller de máquinas herramienta de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Colima por lo que no tuvo costo de insumos para la elaboración.

Adquisición de datos y sensores

La Raspberry Pi 3 es una computadora que permite controlar hardware con Python. Esta placa permite la creación de códigos mediante el programa Geany para la lectura de datos de los sensores que se le conecten, así como para realizar el almacenamiento de estos datos. Para el funcionamiento de la Raspberry se requiere de una pantalla, un teclado, un ratón y de una fuente de alimentación [8].



Figura 2. Modelado 3D del edificio reducido.

Fuente: Elaboración propia.

Con las librerías smbus2 es posible la comunicación I2C entre la Raspberry y los sensores MPU-6050. Estos sensores se conectaron a un multiplexor TCA9548A para la lectura simultánea por el mismo bus utilizando los puertos SDA y SCL tanto de la Raspberry como del módulo MPU. Por otro lado, la librería matplotlib se emplea para visualización de los datos en tiempo real.

Los módulos están instalados en el borde del piso 1 y 2, con los cuales se obtienen las mediciones de aceleración y desplazamiento de los pisos durante las pruebas que se realizan. Su conexión se muestra en la Figura 3.

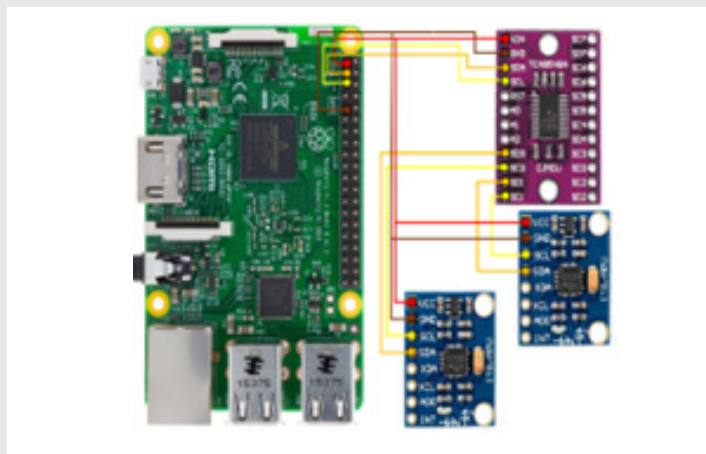


Figura 3. Conexiones del MPU-6050, multiplexor y Raspberry Pi 3.

Fuente: Elaboración propia.

La Raspberry Pi 3 adquiere 30 muestras por segundo del sensor MPU-6050, lo que permite una calibración automática para compensar el bias inicial. Además, mediante código integrado, la Raspberry Pi puede generar gráficos en tiempo real del desplazamiento y la aceleración de los pisos, eliminando la necesidad de software externo para su procesamiento. Más aún, los datos de los sensores son almacenados en un archivo .CSV (Comma Separated Values) que facilita su exportación a otros programas para realizar análisis de estos.

El diagrama mostrado en la Figura 4 ilustra el proceso completo de medición de vibraciones. Este inicia con la inicialización del sistema y calibración automática de los sensores para determinar su bias. Durante la operación normal, el sistema ejecuta de manera cíclica, a 30 Hz, la lectura de los acelerómetros, la corrección del bias, el filtrado de las señales, el almacenamiento de datos en formato CSV y la actualización de los gráficos en tiempo real. Al concluir la prueba, el proceso finaliza de forma ordenada, garantizando la integridad de los datos registrados. Este flujo asegura mediciones precisas y sincronizadas con la excitación sísmica aplicada.

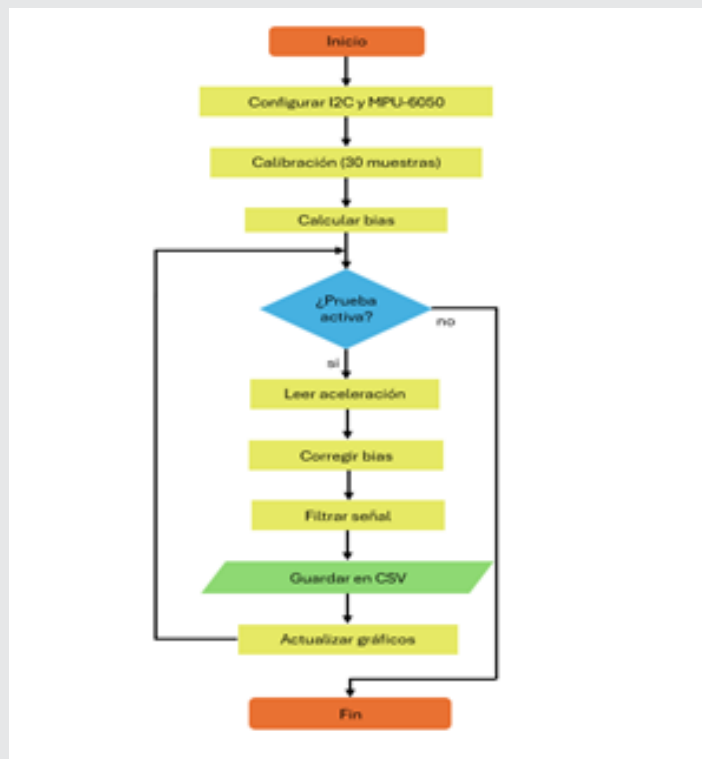


Figura 4. Diagrama de flujo detallado del sistema de adquisición de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Modelo matemático del edificio

El edificio reducido consta de 2 pisos, como se muestra en la figura 5. El primer piso tiene una masa de 5.14 kg y el segundo una masa de 3.58 kg. Cuenta con 4 columnas de aluminio, el cual tiene un módulo de elasticidad de 68.9 GPa. Cada columna tiene una altura de 0.3

m y son de forma rectangular con un ancho de 0.0193 m por 0.0014 m de espesor.

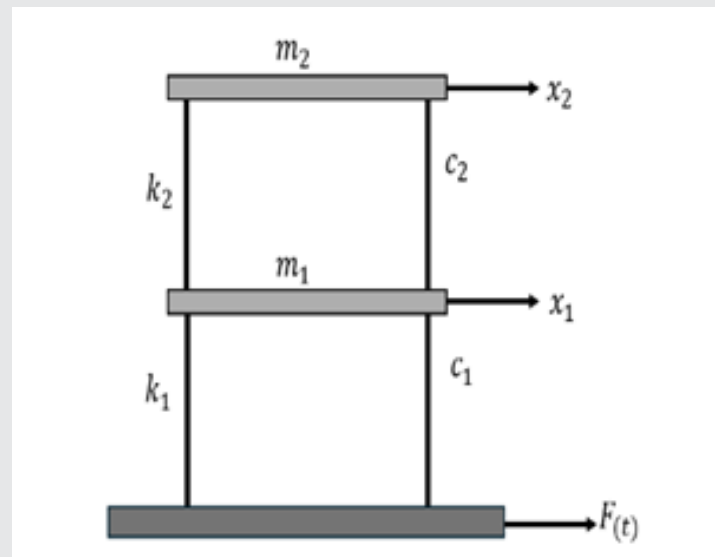


Figura 5. Edificio de dos pisos.

Fuente: Elaboración propia.

La fórmula para encontrar el segundo momento de inercia de cada columna es:

$$I = \frac{b^3 a}{12} \quad \text{Ec. (1)}$$

La rigidez de la columna se calcula como:

$$k = \frac{12EI}{L^3} \quad \text{Ec. (2)}$$

Obteniendo una rigidez de las 4 columnas de aluminio de 532.1742 KN/m.

Matriz de rigidez y masa

La matriz de rigidez K y la matriz de masa M del edificio se define como:

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde k_i es la rigidez del piso dada en (2), y m_i es la masa para cada piso. Estas matrices están dadas por:

$$K = \begin{bmatrix} 1,064.34 & -532.174 \\ -532.174 & 532.174 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$M = \begin{bmatrix} 5.14 & 0 \\ 0 & 3.58 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde las unidades de K son N/m, mientras que las de la masa M son kg.

Modelo matemático del edificio

Las frecuencias naturales ω_i , $i=1,2$ y los modos de vibración ϕ_i se obtienen resolviendo el siguiente problema de valores propios:

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad \text{Ec. (7)}$$

Las frecuencias naturales en rad/s se calculan tomando la raíz cuadrada de los valores propios de la matriz M-1K. Estas frecuencias (rad/s) son:

$$\omega = [7.0982, 17.4693]^T \quad \text{Ec. (8)}$$

Las frecuencias naturales en Hz del edificio son:

$$f = [1.1297, 2.7803]^T \quad \text{Ec. (9)}$$

Los modos de vibración ϕ_i correspondientes a estas frecuencias son:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= [-1.0541, 1]^T, \\ \phi_2 &= [-0.8011, -1.2122]^T \end{aligned} \quad \text{Ec. (10)}$$

Esto representa que mientras que la estructura se excita con la frecuencia ω_1 , los pisos se mueven en direcciones opuestas. Por otro lado, en la frecuencia ω_2 los pisos se encuentran en fase, es decir, se desplazan en el mismo sentido, como se muestra en la Figura 6.

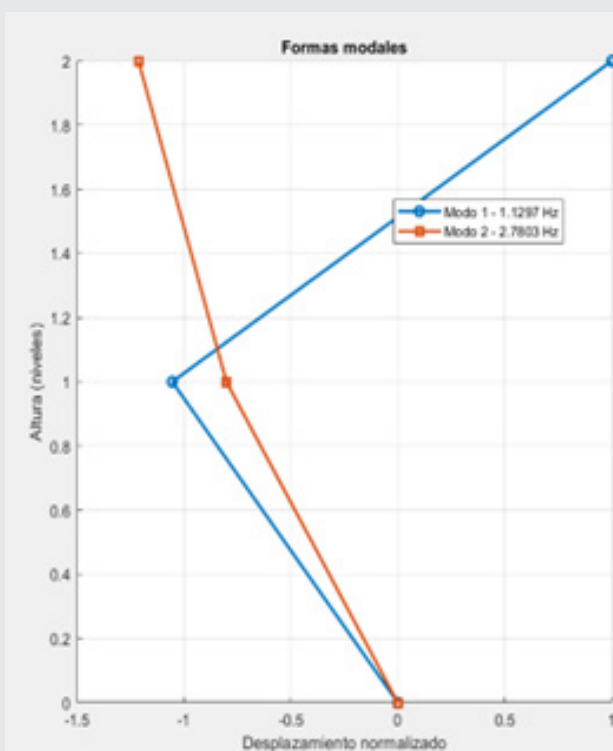


Figura 6. Representación de los modos de vibración.

Fuente: Elaboración propia.

Amortiguamiento modal

El amortiguamiento modal ζ_i , $i=1,2$ se calcula utilizando amortiguamiento Rayleigh de la siguiente manera:

$$C = \alpha M + \beta K \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde α y β son coeficientes que se determinan para lograr el factor de amortiguamiento deseado. En este caso 5% de factor de amortiguamiento en los modos de interés, resultando:

$$\alpha = 0.1, \quad \beta = 0.1 \quad \text{Ec. (12)}$$

Y se calcularon a partir de la siguiente formula:

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad \text{Ec. (13)}$$

Factores de participación

Los factores de participación T_i indican la contribución de cada modo a la respuesta total del sistema. Se calcula como:

$$T_i = \frac{\phi_i^T M L}{\phi_i^T M \phi_i} \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde L es el vector de influencia, que para un sismo en un solo eje es un vector de unos. Los resultados obtenidos son:

$$T = [-0.1978, -0.9881]^T \quad \text{Ec. (15)}$$

Este resultado indica que el segundo modo contribuye más a la respuesta sísmica que el primer modo.

RESULTADOS

Experimentales

Se realizó una prueba experimental utilizando la mesa vibratoria de la Figura 7, que se encuentra en el laboratorio de Mecatrónica, de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Colima. En esta mesa vibratoria se sujetó el edificio reducido y se generó una excitación simulando el terremoto Northridge de 1994 escalado, cuya aceleración se muestra en la Figura 8.

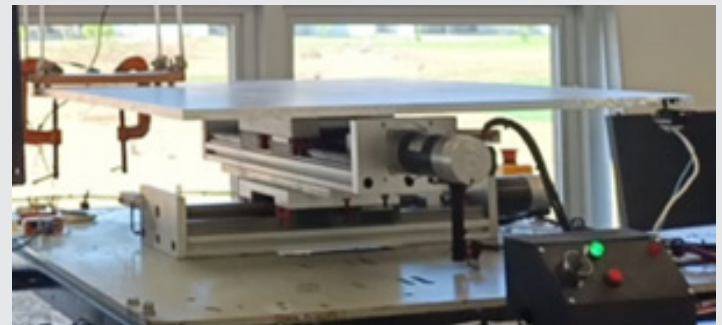


Figura 7. Mesa vibratoria ubicada en el laboratorio de mecatrónica de la FIME, Universidad de Colima.

Fuente: Elaboración propia.

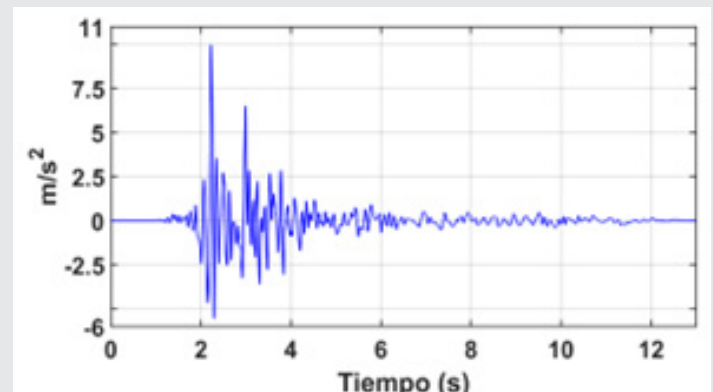


Figura 8. Aceleración de la mesa vibradora.

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Figura 9, los dos módulos MPU 6050 están colocados en el primer y segundo piso de la estructura. Para la prueba, la base de la estructura se fijó sobre la mesa vibratoria, y posteriormente se generó el movimiento sísmico, mientras que la Raspberry Pi 3 almacenaba los datos.



Figura 9. Vista superior de la ubicación de los módulos MPU-6050 en el edificio a escala.

Fuente: Elaboración propia.

Irving Rodríguez [9] presenta el video del experimento. Durante la prueba experimental se observó la deformación en las columnas que se muestra en la Figura 10. Además, la Figura 11 presenta las señales de posición y de aceleración de los pisos.



Figura 10. Deformación de las columnas del edificio a escala durante la prueba.

Fuente: Elaboración propia.

La estructura permite realizar pruebas con diferentes masas en el primer o segundo nivel. Al conocer la constante de rigidez de las columnas, así como sus dimensiones, se calculan las frecuencias naturales que tiene el edificio dependiendo de la masa que se le agregue.

Durante la prueba experimental se generó un archivo CSV para el almacenamiento de las lecturas obtenidas de aceleración y desplazamiento durante la prueba. Los valores de aceleración se muestran en la Figura 12 para el primer piso y en la figura 13 para el segundo piso.

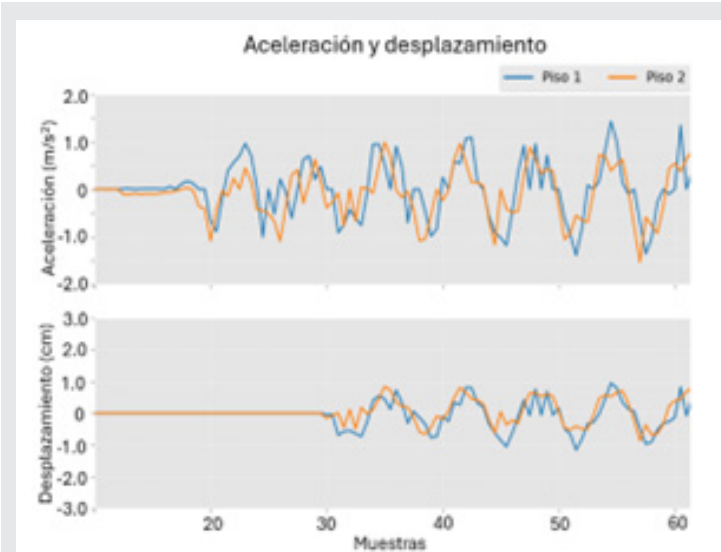


Figura 11. Gráficos en tiempo real de aceleración y desplazamiento en la Raspberry Pi 3.

Fuente: Elaboración propia.

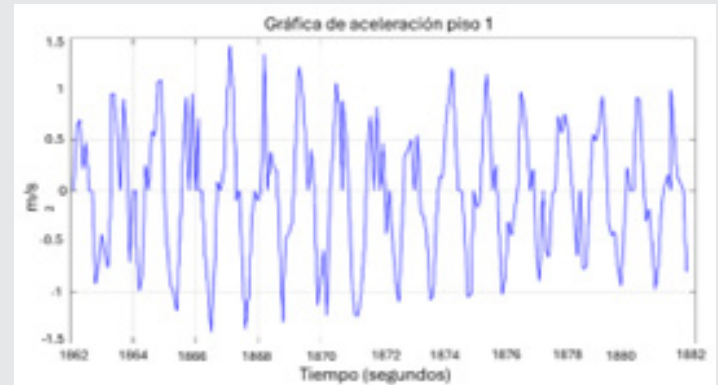


Figura 12. Gráficos de aceleración del primer piso obtenido durante la prueba.

Fuente: Elaboración propia.

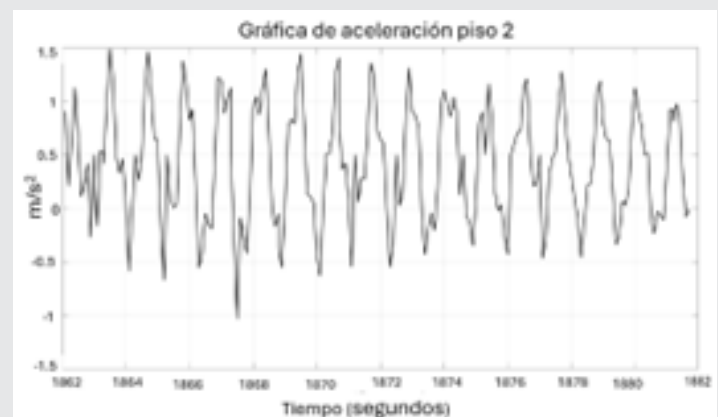


Figura 13. Gráficos de aceleración del segundo piso obtenido durante la prueba.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las señales de aceleración registradas en el primer y segundo piso (almacenadas en el archivo CSV), se obtuvo su representación en frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Como se observa en las Figs. 14 y 15, los picos de amplitud son muy

cercanos a las frecuencias naturales calculadas en (9), indicando condiciones de resonancia. Adicionalmente, estos resultados validan la ecuación (15), ya que la máxima amplitud ocurre en la frecuencia del segundo modo. Este comportamiento se explica por la distribución de masas del edificio: al ser la masa del primer piso significativamente mayor (5.14 kg) que la del segundo (3.58 kg). Aunque ambos pisos tienen la misma rigidez, el segundo modo adquiere mayor participación dinámica.

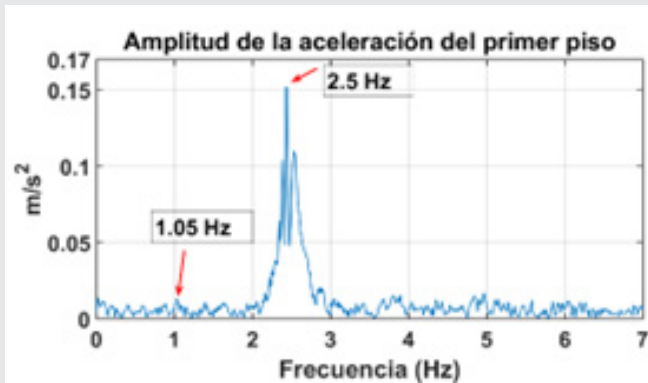


Figura 14. Transformada rápida de Fourier del primer piso obtenido durante la prueba.
Fuente: Elaboración propia.

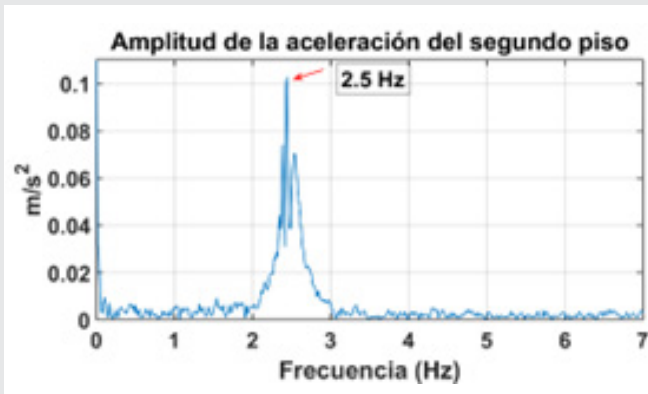


Figura 15. Transformada rápida de Fourier del segundo piso obtenido durante la prueba.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos durante las pruebas son alentadores, ya que la respuesta de los sensores de aceleración y de posición fue la esperada para poder capturar con precisión los movimientos dinámicos del edificio propuesto de bajo costo, el cual permitió comparar los resultados teóricos con los experimentales. Esto hace posible emplearlo en cursos de ingeniería para validar la teoría de control de vibraciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen SECIHTI, PRODEP-SEP, y a la Universidad de Colima por el apoyo para la realización de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Romero S. (2024). Los 10 terremotos más impactantes del último siglo. Muy Interesante. Disponible en: <https://www.muyinteresante.com/naturaleza/17089.html>
- [2] Espíndola V. H., y Campos, X. A. (2018) ¿Qué son los sismos, dónde ocurren y cómo se miden? *Revista Ciencia*, 69,(3), 45-52. [En línea]. Disponible en: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/imagenes/revista/69_3/PDF/QueSonSismos.pdf
- [3] Concha, A., Garrido, R. y Álvarez-Icaza, L. (2016). Identification of shear buildings using an instrumental variable method and linear integral filters. *Journal of Sound and Vibration*, 385, 149-170. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.09.043>
- [4] Martínez, R. (2014). Control de estructuras en el espacio de estados. Ciudad de México. UNAM.
- [5] UNAM. Laboratorio de control de vibraciones, Instituto de Ingeniería UNAM. Obtenida el 4 de septiembre de 2024, de la página electrónica: <https://www.iingen.unam.mx/es-mx/Investigacion/Capacidades-Experimentales/Control-de-vibraciones/Paginas/default.aspx>
- [6] Guéguen, P., Michel, C. y Couboulex, D. G. (2021). Comparing Direct Observation of Torsion with Array-Derived Rotation Rates in a Reinforced Concrete Building. *Sensors*, 21(3), 985. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s21030985>
- [7] Kurzych, A., Kasprzyk, M., Kocierz, R., y Śliwka, J. (2016). The laboratory investigation of the innovative sensor for torsional effects in engineering structures' monitoring. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(5), 815-825. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0181-3>
- [8] Halfacree, G., y Upton, E. (2016) *Raspberry Pi User Guide* (4ª ed.) Chichester: Wiley.
- [9] Rodríguez, I., (2025). Edificio a escala excitado sísmicamente. [Video]. YouTube. [En línea]. Disponible en: <https://youtu.be/ss0MkpJ8Xn0?si=64wm4y-NINRgfGcz3>.