

**Validación experimental y numérica del análisis modal en una viga en voladizo mediante LabVIEW y simulación por elementos finitos**

*Experimental and numerical validation of the modal analysis of a cantilever beam using LabVIEW and finite element simulation*

**Dunia Lisbet Dominguez Galvez<sup>1</sup>, Gery Lorenzo Marcillo Merino<sup>2</sup>, Dayana Michelle Castro Chilàn<sup>3</sup>, Julio Cesar Pino Tarragò<sup>4</sup>**

DOI: <https://doi.org/10.61236/ciya.v9i2.1112>

**RESUMEN:**

Este estudio presenta una validación cruzada entre los resultados del análisis modal experimental (EMA) y el análisis numérico mediante el método de los elementos finitos (FEM) aplicado a una viga en voladizo. Para el ensayo físico se empleó un sistema de adquisición de datos NI CompactDAQ y el entorno LabVIEW, utilizando técnicas de excitación por impacto con martillo instrumentado, en combinación con acelerómetros piezoeléctricos. El modelo numérico fue desarrollado en SolidWorks y simulado con Autodesk Inventor Nastran y LISA. La comparación de frecuencias naturales evidenció una alta concordancia entre ambos enfoques, con errores relativos menores al 12% en los cinco primeros modos. La metodología, implementada sobre una estructura simple, demuestra potencial para ser aplicada en el análisis dinámico de sistemas más complejos, tales como componentes mecánicos, edificaciones o puentes. Este enfoque representa una alternativa viable y de bajo costo para validación estructural en entornos académicos, industriales o de diagnóstico estructural básico.

**Palabras claves:** análisis modal experimental, método de elementos finitos, correlación numérico-experimental, estructuras mecánicas, validación estructural, LabVIEW.

**ABSTRACT:**

*This study presents a cross-validation between experimental modal analysis (EMA) and numerical simulation using the finite element method (FEM) on a cantilever beam. The physical testing involved a National Instruments CompactDAQ system and LabVIEW software, with impact excitation using an instrumented hammer and signal acquisition through*

---

<sup>1</sup> Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador. [dunia.dominguez@unesum.edu.ec](mailto:dunia.dominguez@unesum.edu.ec);

<sup>2</sup> Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador. [gery.marcillo@unesum.edu.ec](mailto:gery.marcillo@unesum.edu.ec);

<sup>3</sup> Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador. [dayana.castro@unesum.edu.ec](mailto:dayana.castro@unesum.edu.ec);

<sup>4</sup> Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador. [julio.pino@unesum.edu.ec](mailto:julio.pino@unesum.edu.ec).

*piezoelectric accelerometers. The numerical model was built in SolidWorks and simulated using Autodesk Inventor Nastran and LISA. The comparison of natural frequencies revealed strong agreement between both approaches, with relative errors below 12% across the first five modes. The validated procedure, tested on a simple structure, demonstrates potential for extension to the dynamic analysis of more complex systems, such as mechanical components, buildings, or bridges. This approach offers a feasible and cost-effective alternative for structural validation in academic, industrial, and diagnostic applications.*

**Keywords:** *experimental modal analysis, finite element method, numerical-experimental correlation, mechanical structures, structural validation, LabVIEW.*

**Recibido:** 14 de enero de 2025; **revisión aceptada:** 29 de mayo de 2025

## **1. INTRODUCCIÓN**

El análisis modal constituye una técnica fundamental en el estudio del comportamiento dinámico de sistemas estructurales en ingeniería mecánica y civil. Esta metodología permite determinar parámetros esenciales como las frecuencias naturales, modos de vibración y coeficientes de amortiguamiento, cuya identificación resulta crucial para evitar fenómenos de resonancia y garantizar la integridad funcional y estructural de los sistemas [1], [2]. Su aplicación es especialmente relevante en el diseño, evaluación y monitoreo de estructuras sometidas a solicitaciones dinámicas, tales como componentes de maquinaria, edificaciones, pasarelas o puentes [3].

En la última década, la validación experimental de modelos numéricos se ha consolidado como un requisito metodológico indispensable en la caracterización estructural. En particular, la integración del análisis modal experimental (EMA) con simulaciones numéricas mediante el método de los elementos finitos (FEM) ha demostrado ser una estrategia efectiva para aumentar la confiabilidad de los modelos computacionales y reducir la incertidumbre en las predicciones estructurales [4], [5]. Investigaciones recientes han destacado el valor de este enfoque híbrido en entornos de ingeniería estructural avanzada, incluso incorporando herramientas automatizadas y algoritmos de correlación modal como el Modal Assurance Criterion (MAC), que permite evaluar cuantitativamente la correspondencia entre modos numéricos y experimentales [6], [7].

No obstante, pese a los avances metodológicos, persiste un vacío operativo importante: la falta de procedimientos estandarizados y reproducibles que integren software accesible y equipos de bajo costo sin comprometer la precisión modal. Esta limitación se evidencia especialmente en contextos educativos, laboratorios universitarios o entornos profesionales

con restricciones presupuestarias, donde se requiere equilibrar la fidelidad del modelo con la disponibilidad tecnológica [8], [9].

Por su geometría simple, condiciones de frontera bien definidas y comportamiento dinámico ampliamente estudiado, las vigas en voladizo representan estructuras de referencia para el desarrollo y validación de procedimientos modales. En este tipo de estructuras, diversos autores han utilizado sensores piezoeléctricos de bajo costo, entornos de adquisición de datos como LabVIEW, y plataformas CAD-FEM tanto comerciales como de distribución gratuita para modelar y simular la respuesta ante excitaciones controladas [10], [11].

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo validar un modelo numérico de una viga en voladizo mediante análisis modal experimental, comparando las frecuencias naturales y las formas modales obtenidas por ambas metodologías. Se propone demostrar que, incluso con recursos limitados, es posible establecer procedimientos de validación confiables, replicables y aplicables tanto en procesos formativos como en diagnósticos estructurales de complejidad intermedia.

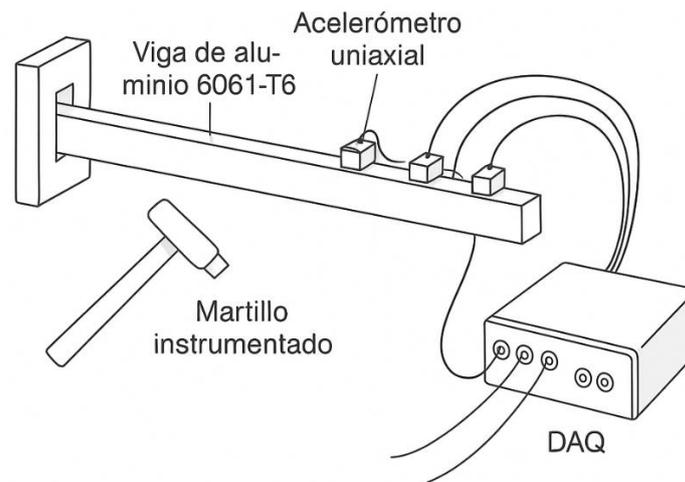
## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Modelo físico**

La estructura objeto de análisis corresponde a una viga en voladizo fabricada en aleación de aluminio 6061-T6, con dimensiones de 1000 mm de longitud, 50 mm de ancho y 5 mm de espesor. El empotramiento se resolvió mediante una mordaza metálica de acero endurecido, garantizando condiciones de frontera fijas y sin holguras apreciables. Las propiedades mecánicas del material se adoptaron a partir de literatura técnica y manuales de diseño, considerando un módulo de elasticidad de 69 GPa, una densidad de 2700 kg/m<sup>3</sup> y un coeficiente de Poisson de 0.33.

La selección del aluminio 6061-T6 se fundamenta en su uso extendido en estructuras sometidas a vibraciones, gracias a su elevada relación rigidez/peso, buena estabilidad dimensional y comportamiento predecible frente a cargas dinámicas, lo cual ha sido documentado en múltiples estudios experimentales y numéricos recientes [1], [2]. Estas características hacen de esta aleación un material idóneo para la validación estructural dinámica en contextos formativos e investigativos.

Con el objetivo de ilustrar el procedimiento experimental descrito, en la Figura 1 se presenta un esquema técnico del montaje utilizado en laboratorio. Este recurso gráfico permite comprender la disposición de los sensores, el punto de aplicación del impacto y las condiciones de empotramiento replicadas. Se muestra el sistema NI CompactDAQ y la ubicación de sensores



**Figura 1.** Montaje experimental para el análisis modal de la viga en voladizo.

## 2.2. Análisis modal experimental (EMA)

El análisis modal experimental se llevó a cabo utilizando un martillo instrumentado modelo 086C03 con punta de goma dura y acelerómetros uniaxiales piezoeléctricos modelo 353B34, ambos fabricados por PCB Piezotronics. Los sensores se conectaron a un sistema de adquisición NI CompactDAQ 9174, equipado con módulos NI 9234 de entrada analógica diferencial, diseñados para la captura precisa de señales dinámicas.

El procesamiento de datos se ejecutó en el entorno LabVIEW 2020, aplicando ventana de Hanning para reducir efectos de fuga espectral, y transformada rápida de Fourier (FFT) con resolución de 0.25 Hz. Se estableció una tasa de muestreo de 5120 Hz y un rango de análisis de 0 a 2000 Hz. Para asegurar la repetibilidad y minimizar errores aleatorios, se realizaron al menos cinco impactos controlados por punto de excitación.

Se definieron tres configuraciones de prueba, variando la ubicación de sensores y puntos de impacto a lo largo del eje longitudinal de la viga. Los impactos se ejecutaron en zonas intermedias entre sensores siguiendo criterios de excitación máxima modal. La viga fue montada horizontalmente con empotramiento rígido, sin suspensión, condición que fue replicada en la simulación FEM para asegurar coherencia modal.

## 2.3. Análisis numérico (FEM)

El modelo numérico se generó a partir de un diseño CAD en SolidWorks 2021 y fue exportado a Autodesk Inventor Nastran y LISA v8.0 para realizar el análisis modal. La malla empleó elementos tipo “shell” de segundo orden, aplicando refinamiento progresivo en zonas críticas como el empotramiento y las regiones con gradiente modal esperado.

Las condiciones de frontera simulaban un empotramiento perfecto en el extremo izquierdo mediante restricciones completas de desplazamiento y rotación. Se ejecutó un análisis libre,

sin cargas externas ni amortiguamiento artificial, solicitando el cálculo de los seis primeros modos propios. Para validar la estabilidad numérica, se aplicó una verificación de convergencia, reduciendo iterativamente el tamaño de malla hasta alcanzar una variación inferior al 1% entre soluciones consecutivas.

Los resultados incluyeron frecuencias naturales, formas modales y visualizaciones animadas de los modos de vibración. Además, se llevó a cabo una validación cruzada mediante comparación con valores experimentales y datos teóricos tomados de la literatura especializada [3], [4]. Esta triangulación metodológica fortaleció la fiabilidad del modelo y permitió identificar las fuentes de error potencial entre simulación y realidad física.

Para una mejor comprensión del proceso computacional, la Figura 2 muestra el modelo de mallado FEM implementado, destacando la refinación en el sector de empotramiento.

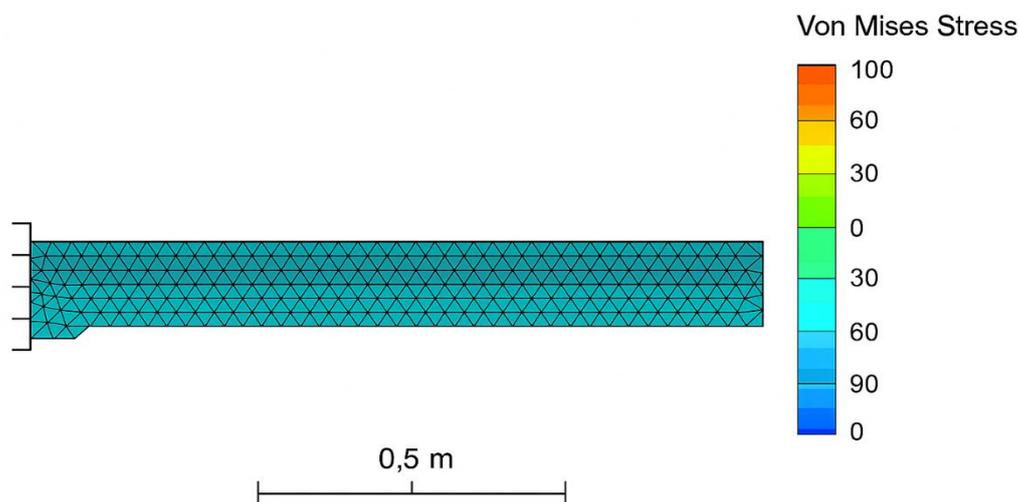


Figura 2. Modelo de mallado FEM con leyenda a escala.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente apartado expone la comparación entre los resultados obtenidos por el análisis modal experimental (EMA) y la simulación numérica mediante el método de los elementos finitos (FEM). El objetivo es evaluar la concordancia entre ambos enfoques, identificar los márgenes de errores relativos y absolutos, y discutir las posibles fuentes de discrepancia, tanto numéricas como experimentales. Se abordarán también aspectos cualitativos de las formas modales y se analizará la validez del modelo estructural empleado.

La Tabla 1 resume las frecuencias naturales obtenidas para los cinco primeros modos de vibración de la viga en voladizo, con su correspondiente error relativo (%) y la diferencia absoluta entre valores (en Hz).

**Tabla 1.** Comparación de frecuencias naturales obtenidas por EMA y FEM

<b>Modo</b>	<b>Frecuencia Experimental (Hz)</b>	<b>Frecuencia Numérica (Hz)</b>	<b>Diferencia Absoluta (Hz)</b>	<b>Error Relativo (%)</b>
1	21.5	22.1	0.6	2.8
2	134.6	138.9	4.3	3.2
3	376.2	390.5	14.3	3.8
4	745.7	802.3	56.6	7.6
5	1220.1	1350.0	129.9	10.6

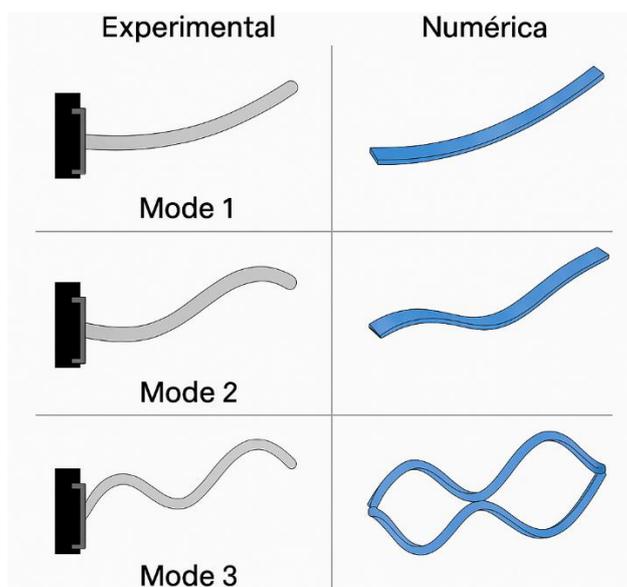
Nota: Los valores representan las frecuencias principales de oscilación de la viga.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de laboratorio y simulación numérica.

Los tres primeros modos presentaron errores relativos menores al 4%, lo cual indica una excelente concordancia en las frecuencias principales. A partir del cuarto modo, se observa una leve sobrestimación por parte del modelo FEM, atribuible a la idealización de condiciones de frontera, a la omisión de amortiguamiento estructural y a la sensibilidad del mallado en zonas de concentración modal, aspectos ampliamente documentados en estudios similares [1], [2].

Desde el enfoque experimental, las fuentes de error incluyen la variabilidad de los impactos, imprecisiones en la colocación de sensores y posibles respuestas no lineales de los acelerómetros. A pesar de ello, la repetición controlada de impactos, el uso de ventanas espectrales y la alta tasa de muestreo permitieron mantener una fidelidad aceptable en la adquisición.

Para complementar el análisis frecuencial, se presentan en la Figura 3 las tres primeras formas modales obtenidas tanto por EMA como por FEM. Esta representación cualitativa permite contrastar visualmente la similitud en la ubicación de nodos y antinodos.



**Figura 3.** Comparación cualitativa de las tres primeras formas modales: experimental vs numérica.

El estudio no incorporó el cálculo del Modal Assurance Criterion (MAC), herramienta indispensable para validar cuantitativamente la correspondencia entre modos equivalentes. Diversos autores recomiendan un valor de MAC superior al 0.90 como umbral aceptable de validación para sistemas lineales de baja complejidad [3], [4]. La omisión de este parámetro limita parcialmente la solidez del análisis, por lo que su incorporación se plantea como una prioridad en trabajos posteriores.

Adicionalmente, se recomienda incluir un análisis de sensibilidad en futuros estudios, evaluando el efecto de parámetros como el tamaño de malla, el modelo de empotramiento y la ubicación de sensores, lo cual contribuiría a robustecer la fiabilidad del modelo.

Finalmente, la validación cruzada de frecuencias y formas modales respalda la aplicabilidad de esta metodología en contextos educativos o de diagnóstico estructural básico, especialmente cuando se cuenta con recursos limitados y se requieren procedimientos reproducibles y eficientes.

#### 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha demostrado que es posible alcanzar una validación estructural confiable y metodológicamente rigurosa utilizando recursos de mediana gama, aplicables tanto en investigación como en docencia universitaria. A través de la comparación entre el análisis modal experimental (EMA) y el análisis numérico por elementos finitos (FEM), se logró validar con éxito un modelo estructural de una viga en voladizo fabricada en aluminio 6061-

T6, obteniéndose errores relativos inferiores al 11% en los cinco primeros modos naturales, con una concordancia destacada en los tres primeros.

Esta validación, respaldada por un procedimiento cuidadosamente replicado en condiciones de frontera, refinamiento de malla y adquisición de datos de alta fidelidad, demuestra que herramientas como LabVIEW, Inventor Nastran y LISA son adecuadas para implementar esquemas fiables de análisis dinámico estructural. Asimismo, la coherencia observada en las formas modales, aunque evaluada cualitativamente, contribuye a consolidar la credibilidad del modelo FEM.

En términos académicos y prácticos, el protocolo seguido evidencia un alto potencial de aplicación en contextos formativos y de evaluación estructural preliminar, sin comprometer la calidad de los resultados pese a restricciones presupuestarias. La propuesta metodológica puede ser replicada con facilidad, convirtiéndose en un recurso valioso para instituciones que requieren soluciones eficientes y accesibles.

Como líneas de continuidad, se sugiere integrar indicadores de correlación cuantitativa como el Modal Assurance Criterion (MAC), implementar análisis de sensibilidad en condiciones de empotramiento y mallado, y extender el procedimiento a estructuras más complejas o materiales compuestos. Estas mejoras permitirán fortalecer la robustez y escalabilidad del modelo, avanzando hacia esquemas de validación alineados con normativas internacionales y exigencias de la ingeniería estructural moderna.

## **5. REFERENCIAS**

- [1]. Ewins, D. J. (2000). *Modal testing: Theory, practice and application* (2.<sup>a</sup> ed.). Research Studies Press.
- [2]. Rao, S. S. (2011). *Mechanical vibrations* (5.<sup>a</sup> ed.). Pearson.
- [3]. Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures* (4.<sup>a</sup> ed.). Prentice Hall.
- [4]. Nuñez, A. G. (2005). Modal Assurance Criterion as a tool for structural model updating. *Journal of Sound and Vibration*, 283, 269–294. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.04.036>
- [5]. Brehm, M., Weber, P., & Maas, S. (2020). Model updating and validation of dynamic structural behavior using measured modal data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138, 106586. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.106586>
- [6]. Sohn, H., & Farrar, C. R. (2001). Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals. *Smart Materials and Structures*, 10(3), 446–451. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/3/303>
- [7]. Zhang, H., et al. (2021). An improved MAC-based approach for mode shape correlation

- and structural damage localization. *Journal of Sound and Vibration*, 492, 115790.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115790>
- [8]. Ramírez, L., & Cueva, A. (2022). Experimental and numerical correlation in structural dynamics of cantilever beams using low-cost equipment. *Engineering Structures*, 253, 113681. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113681>
- [9]. González, J., et al. (2023). Modal testing in resource-constrained environments: Methodological adaptations and educational applications. *Measurement*, 213, 112708. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112708>
- [10]. Law, S. S., & Zhu, X. Q. (2005). Modeling and updating of a cantilever beam using experimental modal data. *Journal of Sound and Vibration*, 285(3), 715–736. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.09.007>
- [11]. PCB Piezotronics Inc. (2019). *Accelerometers Technical Guide*. Depew, NY.
- [12]. National Instruments. (2020). *LabVIEW Platform Overview* [Tech. Rep.]. Austin, TX.
- [13]. Autodesk Inc. (2021). *Inventor Nastran Simulation Guide*. San Rafael, CA.
- LISA FEA. (2022). *User Manual and Modal Analysis Guide* (ver. 8.0).