

Pruebas de Carga Dinámica en Puentes con Sensores de Bajo Costo: Validación en el Acceso Ferroviario al Aeropuerto de Barcelona-El Prat

Dynamic Bridge Load Testing with Low Cost Sensors: Validation at the Rail Access to Barcelona-El Prat Airport

Erika Delgado Zhagui ^{1a}, Seyedmilad Komarizadehasl ^{2b}, Giorgio Ballati ^c, Juan Victor Tirado Gascón ^d y José Turmo ^e.

^a Máster en Ingeniería Estructural. Tunnel and Bridge Technologies. Ingeniera de Estructuras. erika.delgado@tbtechno.com

^b Dr Ingeniero Civil. Universidad Politècnica de Catalunya. Profesor Lector. milad.komary@upc.edu

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. COMSA. Ingeniero de Puentes y Estructuras. giorgio.ballati@comsa.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. COMSA. Jefe Departamento Técnico. juan.tirado@comsa.com

^e Dr Ingeniero de Caminos. Universidad Politècnica de Catalunya. Catedrático de Universidad. jose.turmo@upc.edu

RESUMEN

La realización de pruebas dinámicas en puentes es en muchos casos fundamental para garantizar su seguridad y funcionalidad, permitiendo la identificación de parámetros como las frecuencias naturales y los factores de amortiguamiento. Sin embargo, el elevado costo de los sensores limita su aplicación en diversos proyectos. Este estudio evalúa el sensor LARA (Low-cost Adaptable Reliable Accelerometer) como alternativa económica, comparando su desempeño con el sensor comercial IOLITEI-3XMEMS-ACC-S durante la ejecución de pruebas dinámicas en el acceso ferroviario a la Terminal T1 del Aeropuerto de BCN-El Prat, donde se demostró su viabilidad como herramienta para el monitoreo estructural.

ABSTRACT

The monitoring of dynamic tests on bridges is essential to ensure their safety and functionality, allowing the identification of parameters such as natural frequencies and damping factors. However, the high cost of the sensors limits their application in various projects. This study evaluates the LARA (Low-cost Adaptable Reliable Accelerometer) sensor as an economic alternative, comparing its performance with the commercial sensor IOLITEI-3XMEMS-ACC-S during the execution of dynamic tests in the railway access to Terminal T1 of BCN-El Prat Airport, where its viability as a tool for structural monitoring was demonstrated.

PALABRAS CLAVE: monitorización, acelerómetros, frecuencias propias, amortiguamiento, dinámico.

KEYWORDS: monitoring, accelerometers, eigenfrequencies, damping, bridges, dynamic.

1. Introducción

La realización de pruebas dinámicas en estructuras como los puentes ferroviarios, es esencial para garantizar su seguridad, funcionalidad y mantenimiento [1]. Las pruebas

de carga dinámica son un método fundamental para evaluar el comportamiento estructural de los puentes, ya que permiten determinar parámetros fundamentales como las frecuencias

naturales y los factores de amortiguación. Estos parámetros proporcionan información valiosa sobre la integridad estructural, la estabilidad y la capacidad de disipación de energía del puente bajo cargas dinámicas, garantizando su seguridad y funcionalidad [1] [2] [3]. Sin embargo, uno de los principales retos en estas evaluaciones es el alto costo de los equipos de medición, como los acelerómetros comerciales, que limita su implementación en proyectos de bajo presupuesto o en otros contextos donde el monitoreo frecuente es necesario [4] [5].

Como solución a este desafío, los sensores LARA (por sus siglas en inglés, Low-cost Adaptable Reliable Accelerometer) emergen como una alternativa económica con el potencial de ofrecer un desempeño comparable al de los acelerómetros comerciales. En este estudio, se tomará como referencia los resultados de la prueba de carga dinámica instrumentada por la empresa INDAICO (Empresa experta en auscultación y control de estructuras) que utilizó el modelo IOLITEI-3XMEMS-ACC-S de la marca DEWESoft para validar la precisión y confiabilidad de los sensores LARA bajo condiciones de carga reales, con el objetivo de evaluar su viabilidad como herramienta efectiva para el monitoreo estructural.

El objetivo principal de este trabajo es presentar y evaluar los sensores LARA como una solución económica al elevado coste de los acelerómetros comerciales, validando su desempeño a través de pruebas de carga dinámica realizadas en el acceso ferroviario a la Terminal T1 del Aeropuerto de Barcelona-El Prat. Los objetivos específicos son: (1) **Validar el Desempeño de los Sensores LARA:** Comparar la precisión de los sensores LARA con los acelerómetros comerciales de DEWESoft en la captura de respuestas estructurales bajo condiciones dinámicas. (2) **Medir y Analizar Parámetros Dinámicos:** Obtener y analizar parámetros como las frecuencias propias y los factores de

amortiguamiento, utilizando ambos tipos de sensores, para evaluar su capacidad de representar el comportamiento estructural. (3) **Desarrollar Herramientas de Análisis en MATLAB:** Diseñar algoritmos en MATLAB que permitan procesar los datos recolectados y generar resultados claros y reproducibles, reduciendo la dependencia de software comerciales.

Este estudio busca demostrar que los sensores LARA pueden ser una herramienta viable, económica y confiable para el monitoreo estructural, promoviendo su uso en aplicaciones prácticas dentro del ámbito de la ingeniería civil.

2. Metodología

2.1 Descripción de la estructura

El puente ensayado forma parte del nuevo acceso ferroviario a la Terminal T1 del Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat, construido por COMSA, el cual consta de 13 vanos isostáticos. Las pruebas de este informe se realizaron en el Vano 1 del puente cuya luz es de 27.61 m. Está conformado por un tablero compuesto por 7 vigas de hormigón pretensado del tipo HIPERTIGRE-180.18, con un ancho inferior de 0.80 m, un ancho superior de 1.10 m, y un canto de 1.80 m. La sección transversal incluye una losa "in situ" con un canto constante de 0.25 m. Para mayor ilustración, en la Figura 1 se muestra la sección transversal del vano 1.

2.2 Instrumentación

Para llevar a cabo las pruebas dinámicas en el vano 1, se emplearon instrumentos de alta precisión para registrar las vibraciones en la estructura. La instrumentación, incluyó un acelerómetro comercial IOLITEI-3XMEMS-ACC-S al cual se denominará como DEWE y un acelerómetro de bajo costo LARA, cuyas características se detallan en la Tabla 1.

SECCIÓN TRANSVERSAL VANOS 1, 2 Y 13

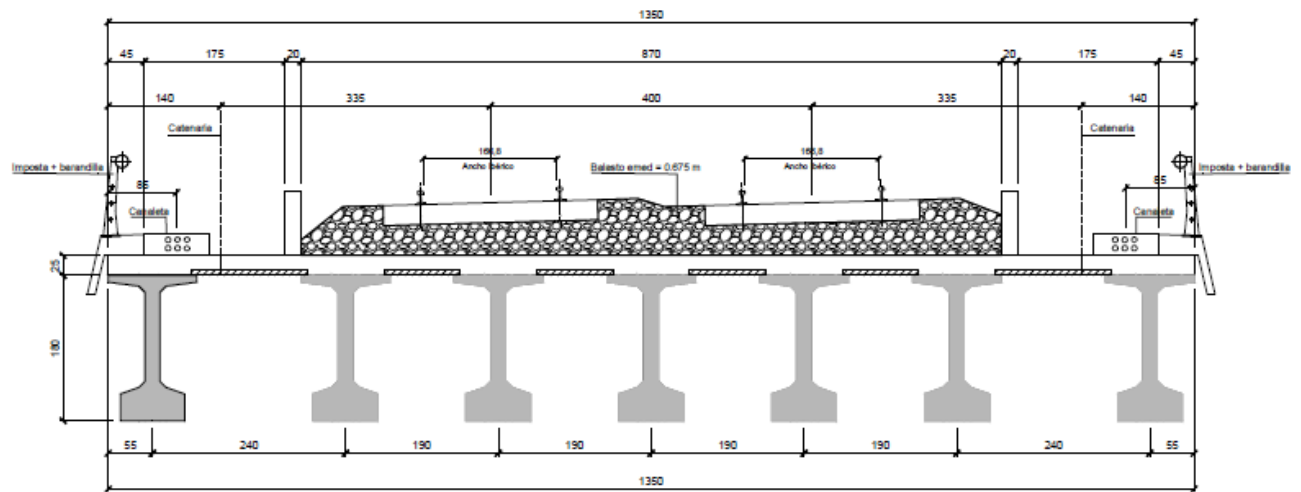


Figura 1. Sección transversal del vano 1.

Tabla 1. Características de la instrumentación para la prueba de carga dinámica.

Sensor	Rango de medición	Ancho de banda (Hz)	Tasa de muestreo (Hz)	Mín. aceleración detectable (micro-g)	Rango dinámico (Db)	Densidad espectral de ruido ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)
IOLITEI-3XMEMS-ACC-S [8] (DEWE)	$\pm\text{g}15$	0 -460	1000	2.1	137	0.7
LARA [5]	$\pm 2.0 \text{ g}$	0 – 61	333	60	90	51

El acelerómetro comercial DEWE está conectado mediante un cable LAN, permitiendo la transmisión eficiente de datos sin necesidad de cables adicionales para la alimentación. La Figura 2 muestra la carcasa del acelerómetro la cual protege y asegura una correcta recolección de los datos.

El acelerómetro LARA está alojado en una estructura diseñada para proteger y asegurar su funcionamiento en condiciones de prueba. La Figura 3.a ilustra la caja 1, una carcasa de aluminio que alberga el acelerómetro y se fija a la estructura del puente. Esta caja ha sido diseñada para ser ligera y resistente, facilitando su instalación y garantizando la protección del sensor contra factores externos. En la Figura 3.b, se muestra la caja 2 de color negro, que contiene el microprocesador y el sistema de adquisición

de datos, y la batería que proporciona la energía necesaria para su funcionamiento autónomo.

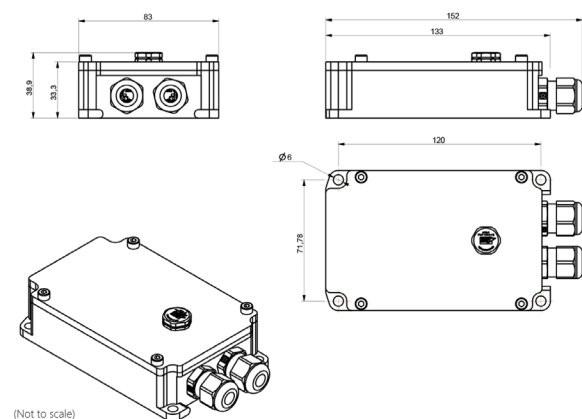


Figura 2. Caja de acelerómetros de IOLITEI-3xMEMS-ACC. Dimensiones en mm.

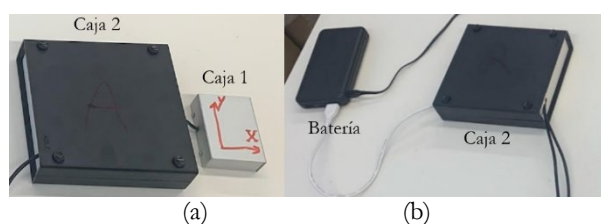


Figura 3. a) Caja de aluminio (Caja 1) y caja de color negro (Caja 2), b) Caja de color negro (Caja 2) y la batería.

Los acelerómetros fueron instalados mediante fijación directa a la estructura del puente utilizando resina epoxi y tornillos, según los requerimientos específicos de cada ubicación. Este método asegura la estabilidad de los sensores y la precisión de las mediciones obtenidas.

2.3 Diseño de las pruebas de carga dinámica

Según lo establecido en la normativa ADIF NAP 2-4-2.0 [6], en la fase de obra nueva se llevan a cabo dos tipos de ensayos de carga: uno con camiones y otro con vehículos ferroviarios. El presente ensayo corresponde al primer tipo, es decir, el ensayo con camiones. Su objetivo principal es verificar la correcta concepción y ejecución del puente, evaluando su comportamiento dinámico estructural en esta etapa de construcción, en la que la vía aún no está instalada. Este tipo de prueba resulta crucial para garantizar tanto la seguridad como la durabilidad de la estructura bajo cargas dinámicas. En consecuencia, se considera una prueba de carga provisional, que permitirá detectar posibles deficiencias y asegurar que la estructura pueda soportar adecuadamente las cargas dinámicas antes de la instalación definitiva de la vía.

La ejecución de la prueba de carga dinámica se llevará a cabo conforme a las directrices establecidas en el capítulo 8.3 del documento titulado "*Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera*" (Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, 1999) [7].

La prueba dinámica consistió en hacer circular un camión sobre el eje central de la vía a lo largo de todo el puente a diferentes velocidades para simular condiciones de tráfico, siendo esta la fuente de excitación sobre la estructura. La Figura 4 muestra las dimensiones y pesos por eje del camión que empleado en las pruebas de carga. Las diferentes velocidades a las que circuló el vehículo están descritas en la Tabla 2.

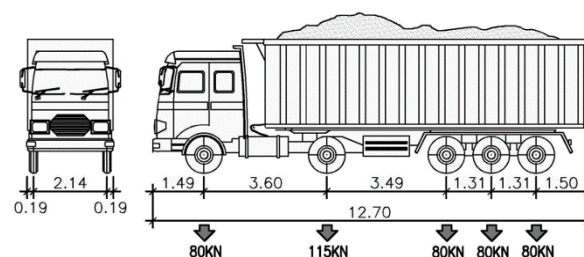


Figura 4. Esquema del camión utilizado para las pruebas de carga.

Tabla 2. Niveles de velocidad de camiones ensayados sobre el puente.

Tipo	Velocidad
Media	30 km/h
Rápida	40 km/h
Obstáculo a una velocidad de:	30 km/h

Se instalaron los equipos de medida en el vano 1, en el centro del vano sobre la viga central y sobre los ejes de apoyo, con el objetivo de adquirir registros de aceleraciones en esos puntos que permitan realizar un análisis de frecuencias propias y la evaluación del coeficiente de amortiguamiento. En la Figura 5 se ilustra la ubicación de los sensores en la sección longitudinal y en planta del puente.

Siguiendo con lo establecido en la referencia [7], se detallan las características del ensayo dinámico de acuerdo al parámetro a evaluar.

Tabla 3. Características del ensayo dinámico de acuerdo al parámetro medido.

Parámetro medido	Tren de carga	Velocidad del tren de carga	Disposición de obstáculo
Frecuencia	1 camión	Media y rápida	Opcional
Amortiguamiento	1 camión	Media y rápida	Opcional

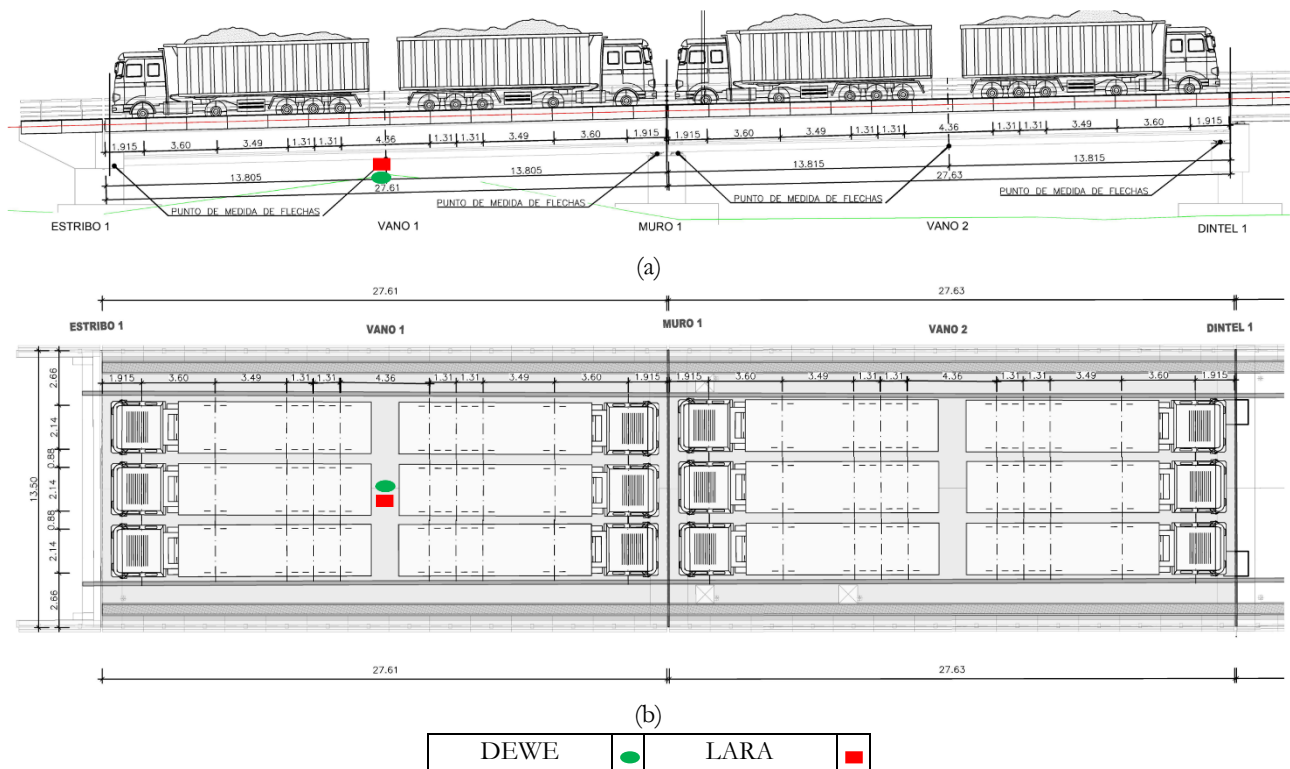


Figura 5. Ubicación de los sensores. a) Sección longitudinal y b) Planta del puente en estudio.

3. Desarrollo de herramientas en Matlab para el procesamiento de datos

En este capítulo se presentan los pasos de procesamiento de desarrollados para la identificación de las frecuencias propias de la estructura y el coeficiente de amortiguamiento implementando herramientas de MATLAB mediante el análisis del registro de aceleraciones obtenidas durante las pruebas de carga dinámica.

3.1 Identificación de frecuencias propias

- Recopilación de datos de aceleración: Primero, se deben obtener los datos de las aceleraciones en función del tiempo, que corresponden a las mediciones realizadas con los acelerómetros.
- Filtrado de la señal: Antes de realizar la FFT, es importante aplicar un filtro para

eliminar el ruido de alta frecuencia o cualquier componente no deseado. Se puede utilizar un filtro pasa-bajos, por ejemplo, para filtrar la señal. Para aplicar un filtro de paso bajo de 0.3Hz se deberá implementar el filtro de Butterworth definida en la ecuación (1).

$$[b,a]=\text{butter}(4,\text{cutoff}/(\text{fs}/2), \text{'low'}) \quad (1)$$

Donde, $\text{fs} = 350$ es la frecuencia de muestreo de acelerómetros LARA, $\text{cutoff} = 0.3$ es la frecuencia de corte.

- Transformada rápida de Fourier (FFT): Una vez que los datos han sido filtrados, se realiza la FFT para convertir los datos del dominio del tiempo al dominio de frecuencia. Esto permite identificar las frecuencias dominantes de vibración de la estructura. Para ello se deberá implementar en el código la función FFT (2).

$$\text{fft_signal} = \text{fft}(\text{acc_filtrada}) \quad (2)$$

- Visualización de los resultados: Finalmente, se puede graficar el espectro de frecuencia para visualizar las frecuencias propias identificadas.
- Identificación de los picos (frecuencias propias): Para identificar las frecuencias propias, se buscan los picos en el espectro de frecuencia. Los picos corresponden a las frecuencias dominantes (modos primarios de vibración).

3.2 Factores de amortiguamiento

Después de identificar las formas modales principales de la estructura, se llevó a cabo un procesamiento adicional para calcular el factor de amortiguamiento asociado a cada frecuencia propia. Esto se logró mediante el filtrado de los datos de aceleración, aislando las frecuencias deseadas y aplicando técnicas de análisis avanzadas como la Transformada Wavelet Continua (CWT). A continuación, se describe el procedimiento detallado:

- Filtrado de Datos por Intervalos Temporales: Los datos registrados durante la prueba fueron adquiridos de forma continua. Para procesar cada ensayo, fue necesario seleccionar los intervalos específicos correspondientes a los tiempos de inicio y fin de cada prueba, basándose en las marcas de tiempo.

Aislamiento de la Frecuencia de Interés: Para identificar el factor de amortiguamiento del primer modo vertical, se aplicó un filtro pasa banda utilizando la Transformada Wavelet Continua (CWT). Este método es especialmente útil porque permite descomponer la señal en el dominio tiempo-frecuencia, lo que facilita aislar eventos localizados en frecuencias específicas[9]. Además, se seleccionó la Wavelet Morse,

conocida por su flexibilidad y alta resolución en aplicaciones estructurales [10].

$$[\text{wt}, \text{f}] = \text{cwt}(\text{aceleracion_intervalo}, \text{fs}, \text{'morse'}) \quad (3)$$

En la ecuación (3) se plantea la aplicación de la transformada wavelet continua tipo morse. Luego, se aplica la ecuación (4) para hallar la señal filtrada en el rango de frecuencias deseado expresado como `freq_range`.

$$\text{Filtered_signal} = \text{icwt}(\text{wt}, \text{f}, \text{freq_range}) \quad (4)$$

- Resultados y Visualización: Finalmente, se graficaron los resultados del análisis, mostrando la señal filtrada para la frecuencia del modo de vibración especificado. Con esta información, se procede a calcular el factor de amortiguamiento empleando las ecuaciones (5) y (6) detalladas en el siguiente capítulo.

4. Resultados

En este apartado, se explica y presenta el procesamiento de datos para la prueba realizada con un camión pasando a 30 km/h. Este análisis incluyó la identificación de las frecuencias propias y el cálculo del coeficiente de amortiguamiento utilizando datos de los sensores LARA y DEWE.

4.1 Identificación de frecuencias propias

4.1.1. Frecuencia propia vertical

La Figura 6 muestra el análisis de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de los datos obtenidos del sensor comercial. La frecuencia propia vertical se identifica claramente por el pico más alto a 9.8 Hz, lo que indica que esta es la primera frecuencia propia vertical del puente construido.

4.1.2. Frecuencia propia transversal

La Figura 7 presenta el espectro de frecuencia transversal del puente, donde el pico más

prominente a 18.7 Hz señala la primera frecuencia propia transversal.

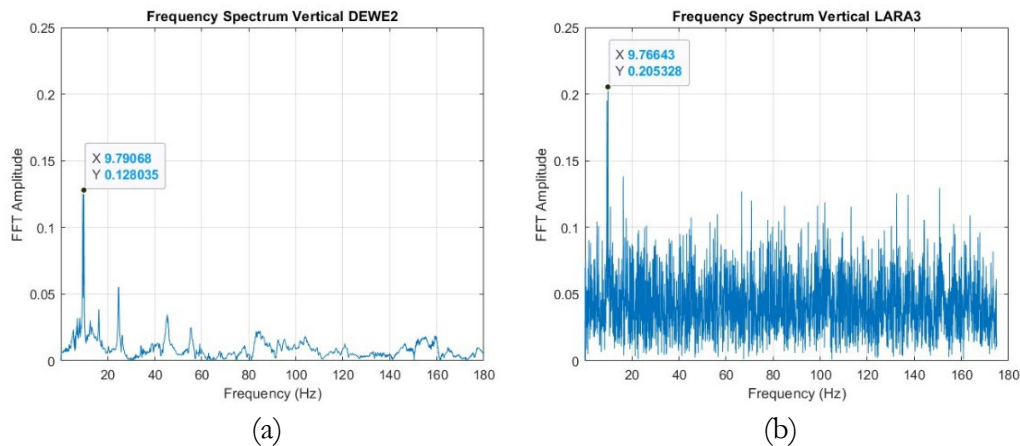


Figura 6. Análisis de FFT para la Frecuencia Propia Vertical: a) utilizando el sensor DEWE. b) utilizando el sensor LARA. Muestra el pico a 9.8 Hz, identificando la primera frecuencia propia vertical.

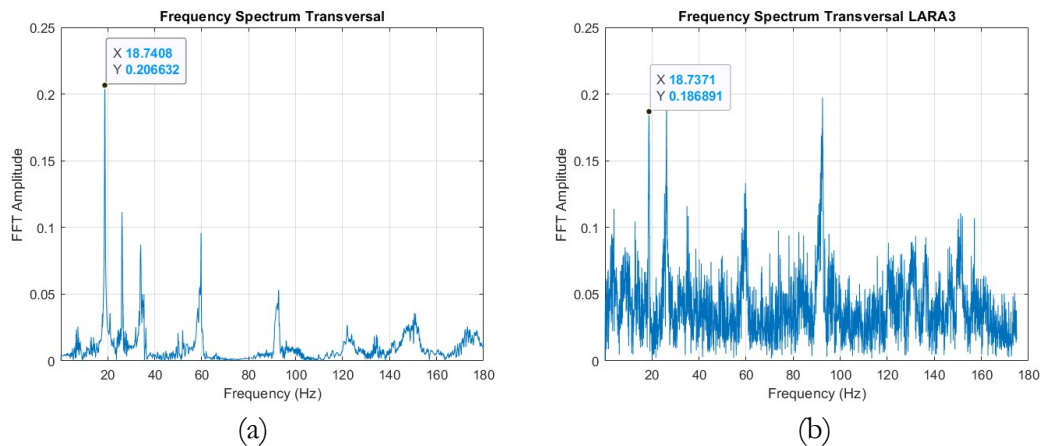


Figura 7. Análisis de FFT para la Frecuencia Transversal: a) utilizando DEWE. b) utilizando LARA. El pico a 18.7 Hz señala la primera frecuencia propia transversal.

4.2 Factores de amortiguamiento

En este caso, se ha realizado el cálculo de amortiguamiento para la primera frecuencia propia vertical. La Figura 8, muestra el registro de vibraciones durante el intervalo específico que se desea analizar.

Aplicando una transformada wavelet continua (CWT) para aislar el rango de frecuencia deseada y reconstruir la señal filtrada en la banda de interés, se obtiene la Figura 9 la cual muestra los resultados de los datos de vibración después de aplicar el filtrado para aislar la frecuencia específica de 9.8 Hz. Esta figura ilustra la señal filtrada en el dominio del tiempo.

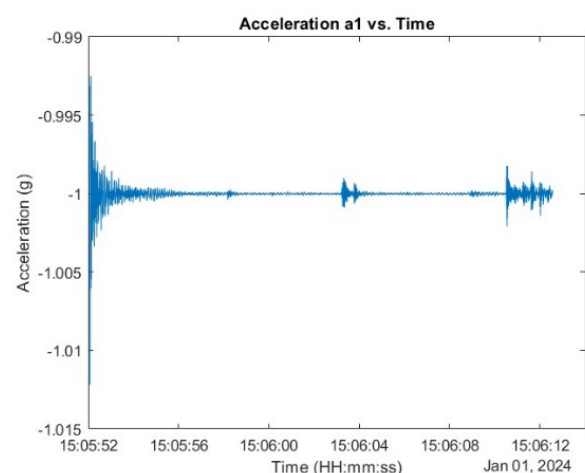


Figura 8. Visualización de los datos de vibración antes de aplicar el filtrado de frecuencia. Muestra el espectro original que será procesado para identificar las frecuencias propias.

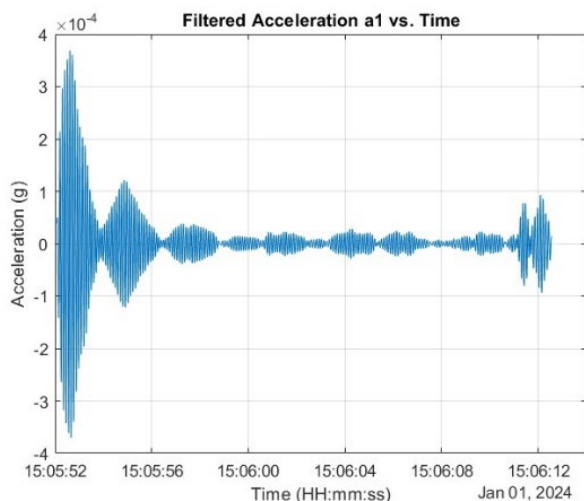


Figura 9. Datos después del filtrado.

Una vez filtrada la aceleración para el primer modo vertical, se seleccionan los datos para calcular el factor de amortiguamiento, tal y como se muestra en la Figura 10.

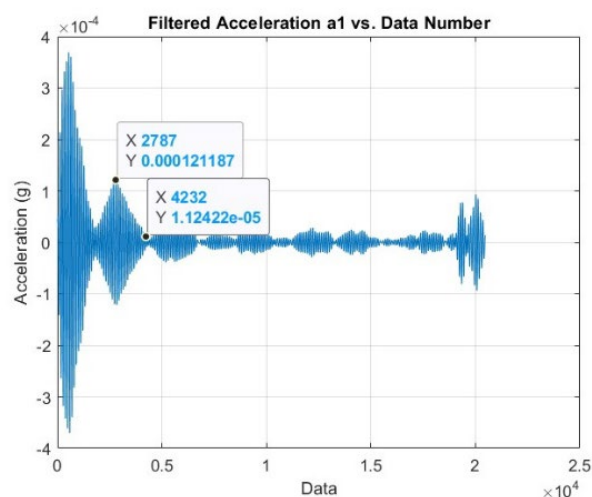


Figura 10. Selección del número de datos para calcular el factor de amortiguamiento.

De acuerdo con [7], el amortiguamiento suele expresarse mediante la fórmula del decremento logarítmico que se define en la ecuación (5).

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \ln \left(\frac{A_0}{A_n} \right) \quad (5)$$

Siendo, n el número de ciclos del intervalo considerado, A_0 y A_n la amplitud de la respuesta dinámica al inicio y al final, respectivamente, de dicho intervalo.

Para expresarlo como fracción del amortiguamiento crítico ζ , será a través del

índice de amortiguamiento el cual se define en la ecuación (6).

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} \quad (6)$$

La fracción de amortiguamiento crítico obtenido, tanto para los acelerómetros LARA y DEWE, para el primer modo vertical del puente analizado fue de 2.1%.

4.3 Comparación de los resultados obtenidos

A continuación, se presenta una tabla que resume los resultados obtenidos para las pruebas realizadas con el camión circulando a velocidades de 30 km/h, 40 km/h y superando un obstáculo (tablón) a una velocidad de 30 km/h. La Tabla 4, compara las frecuencias propias verticales y transversales obtenidas de los ensayos dinámicos realizados durante el paso de camiones, comparando los datos registrados por los sensores LARA y DEWE.

La Tabla 5 muestra el factor de amortiguación correspondiente a la primera frecuencia vertical (Modo 1), comparando los datos obtenidos por los sensores LARA y DEWE durante las diferentes pruebas dinámicas del paso de camiones.

Tabla 4. Resultados de frecuencias propias de ensayos dinámicos de paso de camiones.

Experi mento	LARA		DEWE		Diferencia de frecuencias (%)	
	Frecuencia (Hz)		Frecuencia (Hz)			
	Y	Z	Y	Z	Y	Z
30 km/h	18.731	9.766	18.794	9.791	0.33	0.25
40 km/h	18.714	9.701	18.741	9.761	0.14	0.61
Tablón	18.444	9.667	18.667	9.667	1.19	0.00

Tabla 5. Factor de amortiguamiento en la primera frecuencia vertical (modo 1) de ensayo dinámico de paso de camiones.

Experimento	LARA ζ Z	DEWE ζ Z	Diferencia ζ (%) Z
30 km/h	0.021	0.021	0.00
40 km/h	0.025	0.024	4.00
Tablón	0.024	0.024	0.00

De los resultados de las pruebas dinámicas, se destaca que, durante la medición de las frecuencias propias solo presentó un porcentaje de diferencia por debajo del 0.61% en el eje vertical y del 1.2% en el eje transversal, y en el análisis del coeficiente de amortiguamiento del puente solamente una diferencia del 4%.

Esta comparación entre los datos adquiridos por los sensores LARA y los sensores comerciales DEWE ilustra la capacidad y usabilidad de los sensores LARA en aplicaciones de monitoreo estructural. La efectividad de los sensores LARA para capturar las características dinámicas del puente, comparada con la de los sensores comerciales, valida su utilidad como una alternativa viable y económica para evaluaciones dinámicas de puentes.

5. Conclusiones

El presente informe ha demostrado la eficacia y viabilidad de utilizar sensores LARA, en conjunto con acelerómetros comerciales, para la realización de pruebas de carga dinámica en estructuras de puentes. A través de estas pruebas, se ha validado la capacidad de los acelerómetros LARA para capturar con precisión las respuestas estructurales bajo diferentes condiciones de carga.

Los resultados obtenidos en las pruebas dinámicas encargadas por COMSA e instrumentadas por INDAICO y comparadas con los resultados registrados con LARA, tanto en la identificación de las frecuencias propias

como en el cálculo del coeficiente de amortiguamiento, reflejan una concordancia significativa entre ambos tipos de sensores, con diferencias menores al 1.2% en las frecuencias propias y al 4% en los factores de amortiguamiento. Estos hallazgos validan el uso de los sensores LARA para evaluar el comportamiento dinámico de puentes ferroviarios y otros tipos de estructuras de similares características.

Entre las contribuciones del presente estudio, se resalta lo siguiente:

- **Validación de Tecnología de Bajo Costo:** Este trabajo aporta evidencia científica sobre la efectividad de sensores de bajo costo, como los **LARA**, lo que permite democratizar el acceso a tecnologías avanzadas de monitoreo estructural, especialmente en proyectos con recursos limitados.
- **Desarrollo de Herramientas de Procesamiento:** Se implementaron técnicas avanzadas, como la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la Transformada Wavelet Continua (CWT), utilizando MATLAB, demostrando un enfoque eficiente y reproducible para procesar datos dinámicos de aceleración.
- **Contribución al Campo del Monitoreo Dinámico:** Este estudio reafirma la importancia de realizar pruebas dinámicas para evaluar la seguridad y funcionalidad de puentes y destaca cómo la implementación de sensores económicos puede ser una solución viable en el campo del monitoreo estructural.

En conclusión, los sensores **LARA** no solo representan una **solución económica**, sino también una **herramienta confiable** para las evaluaciones dinámicas de puentes y estructuras en general, contribuyendo significativamente al avance del monitoreo estructural. Con futuros estudios que amplíen y diversifiquen su

aplicación, estos sensores tienen el potencial de transformar las prácticas actuales en la ingeniería civil.

Referencias

- [1] A.B. Menéndez Corral, A.R. González, The Challenge of Bringing a Dynamic Character to Structural Inspections, *Hormigon y Acero* 72 (2021) 205–217. <https://doi.org/10.33586/hya.2021.3041>.
- [2] P. Patrick, P. Jean, T. Martin, Dynamic Testing Procedures for Highway Bridges Using Traffic Loads, *Journal of Structural Engineering* 121 (1995) 362–376. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:2\(362\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:2(362)).
- [3] M. Kohncke, Y. Jaelani, A. Mendler, L. Neumann, P. Wittenberg, A. Rode-Klemm, S. Keßler, Static and Dynamic Load Tests on the Bridge Vahrendorfer Stadtweg, in: *Engineering, Environmental Science*, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.15713>.
- [4] A.I. Ozdagli, B. Liu, F. Moreu, Low-cost, efficient wireless intelligent sensors (LEWIS) measuring real-time reference-free dynamic displacements, *Mech Syst Signal Process* 107 (2018) 343–356. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.01.034>.
- [5] S. Komarizadehasl, F. Lozano, J.A. Lozano-Galant, G. Ramos, J. Turmo, Low-Cost Wireless Structural Health Monitoring of Bridges, *Sensors* 22 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22155725>.
- [6] NAP 2-4-2.0 Pruebas de carga ferroviarias en puentes de ferrocarril, Madrid, 2021.
- [7] Instrucciones de construcción: Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera, Madrid, 1999.
- [8] DEWESoft IOLITEi 3xMEMS-ACC, n.d. www.dewesoft.com.
- [9] V. Vukobratović, T. Yeow, K. Kusunoki, Application of wavelet transforms on acceleration records: Practical approach, in: *COMPDYN Proceedings, National Technical University of Athens*, 2021. <https://doi.org/10.7712/120121.8619.18589>.
- [10] J.M. Lilly, S.C. Olhede, Higher-Order Properties of Analytic Wavelets, (2008). <https://doi.org/10.1109/TSP.2008.2007607>.