

Análisis de Frecuencias Propias Utilizando Sensores de Fibra Óptica y Acelerómetros de Bajo Costo para la Detección de Daños Estructurales

Manuel Antonio González Jiménez^a, Seyedmilad Komarizadehasl^{b*}, José María Pérez Casas^c, Jose Antonio Lozano Galant^d y Jose Turmo^e

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER Grupo de Ingeniería. manuel.gonzalez@mobility.sener

^b Dr. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Profesor lector. Universitat Politècnica de Catalunya. Milad.komary@upc.edu

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER Grupo de Ingeniería. Director de Proyectos. jmaria.perez@mobility.sener

^d Dr. Departamento de Caminos. Profesor catedrático. Universidad De Castilla La Mancha. joseantonio.lozano@uclm.es

^e Dr. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Profesor catedrático. Universitat Politècnica de Catalunya. Jose.turmo@upc.edu

RESUMEN

La monitorización estructural (SHM) es crucial para la seguridad e integridad de la infraestructura. Actualmente, los sensores basados en Arduino están ganando popularidad por permitir un SHM de bajo costo de las estructuras. Este trabajo propone integrar un acelerómetro basado en Arduino, denominado LARA (Low-cost Adaptable and Reliable Accelerometer/Anglemeter), con DAS (Sensorización Acústica Distribuida) para crear una herramienta efectiva de SHM. LARA y DAS se utilizaron en un entorno de laboratorio para analizar los cambios en la frecuencia propia en un modelo de viga con daños localizados inducidos. Finalmente, este estudio evaluó la precisión de LARA, su fiabilidad y su papel como disparador para DAS en la detección de daños localizados. Los hallazgos muestran que tanto LARA como DAS pudieron identificar ligeros cambios en la frecuencia propia de estructuras dañadas con una discrepancia máxima de un 3.68%. En consecuencia, LARA demostró su potencial como catalizador para DAS, reduciendo significativamente las demandas computacionales. Este enfoque ofrece alta precisión en las mediciones de frecuencia propia y mejora las capacidades analíticas al identificar los ejes principales de las frecuencias propias detectadas.

ABSTRACT

Structural Health Monitoring (SHM) is essential for ensuring the safety and integrity of infrastructure. Currently, Arduino-based sensors are gaining popularity for enabling low-cost SHM of structures. This study proposes integrating an Arduino-based accelerometer, named LARA (Low-cost Adaptable and Reliable Accelerometer/Anglemeter), with Distributed Acoustic Sensing (DAS) to create an effective SHM tool. LARA and DAS were employed in a laboratory setting to analyze changes in the natural frequency of a beam model with induced localized damage. Finally, this study assessed LARA's accuracy, reliability, and its role as a trigger for DAS in detecting localized damage. The findings demonstrate that both LARA and DAS successfully identified slight changes in the natural frequency of damaged structures, with a maximum discrepancy of 3.68%. Consequently, LARA showed its potential as a trigger for DAS, significantly reducing computational demands. This approach offers high precision in natural frequency measurements and enhances DAS's analytical capabilities by identifying the principal axes of the detected natural frequencies.

PALABRAS CLAVE: Monitorización estructural, Fibra óptica, LARA, DAS, Detección de daño

KEYWORDS: Structural Health Monitoring, Fiber Optic sensor, LARA, DAS, Damage Detection

1. Introducción

Las infraestructuras de transporte son cruciales para el desarrollo social y económico. Los puentes, como elementos clave de este sistema, requieren inspecciones y mantenimientos regulares para garantizar su seguridad y prolongar su vida útil. El monitoreo de salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés) [1] se ha establecido como una herramienta esencial para detectar daños, mejorar la gestión del ciclo de vida de las infraestructuras y evitar fallos catastróficos [2].

Entre las tecnologías utilizadas en SHM, los acelerómetros MEMS [3] de bajo costo han ganado relevancia debido a su facilidad de instalación, bajo consumo energético y compatibilidad con sistemas de microcontroladores. Sin embargo, estas soluciones presentan desafíos relacionados con su precisión y densidad de ruido [4]. Para abordar estas limitaciones, el sensor LARA (Low-cost Adaptable Reliable Accelerometer) [5] fue desarrollado para proporcionar una alternativa económica y adaptable en el análisis de frecuencias propias. Como se observa en la Tabla 1, LARA se distingue por su densidad de ruido significativamente baja ($51 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$) [6], lo que mejora su capacidad para aplicaciones en SHM, en comparación con otros acelerómetros de bajo costo.

Por otro lado, tanto los sensores ópticos distribuidos (DFOS) [7] como la Sensorización Acústica Distribuida (DAS) [8] ofrecen una alta resolución espacial y temporal [9]. La combinación de tecnologías DFOS y LARA puede aportar ventajas significativas al SHM, permitiendo una monitorización eficiente y precisa de las estructuras.

Tabla 1. Comparación de acelerómetros MEMS de bajo costo para SHM.

Modelo	Frecuencia (Hz)	Densidad de ruido ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)
ADXL335 [4]	100	300
LEWIS [10]	100	400
LEWIS2 [11]	500	300
LSM9DS1 [12]	952	No data
ADXL362 [13]	100	400
LARA [6]	333	51

En este trabajo se evalúa la eficacia de la integración de LARA y DAS para detectar cambios en las frecuencias propias de una viga con daños localizados. Los objetivos principales son: (1) comparar la precisión de ambas tecnologías para la detección de daños estructurales y (2) explorar el potencial de LARA como sistema de disparo para DAS, optimizando el procesamiento de datos.

Este trabajo está organizado en tres secciones principales. La Sección 2 describe la instrumentación utilizada, incluyendo el diseño de la viga y el proceso de adquisición de datos. La Sección 3 detalla los ensayos experimentales realizados y los resultados obtenidos. Finalmente, la Sección 4 presenta las conclusiones principales y el impacto potencial de este enfoque en el SHM.

2. Instrumentación

La instrumentación utilizada en este estudio incluyó el diseño de un modelo de viga de laboratorio y su monitoreo mediante el acelerómetro de bajo costo LARA y un sistema de DAS. A continuación, se describen el modelo de viga, los detalles de los sensores

implementados, y el proceso de adquisición de datos.

2.1 Diseño del modelo de viga

Se diseñó una viga de acero de tipo IPE 100, con una longitud de 3.5 m y apoyos articulados en sus extremos, para simular un sistema de puente simplificado. La viga fue modificada en su punto medio y en un cuarto de su longitud, permitiendo la inducción de daños controlados mediante la remoción o instalación de placas atornilladas. Estas ubicaciones correspondieron a dos puntos específicos:

Ubicación 1: En el punto medio de la viga (centro luz).

Ubicación 2: En un cuarto de la longitud de la viga (1/4 luz).

La Figura 1.a presenta el montaje completo de la viga durante el ensayo experimental y la 1.b muestra un detalle de la ubicación específica donde los daños podían ser inducidos retirando una placa para simular un estado de daño, o reinstalándola para simular un estado sin daño.

2.2 Instrumentación con DAS

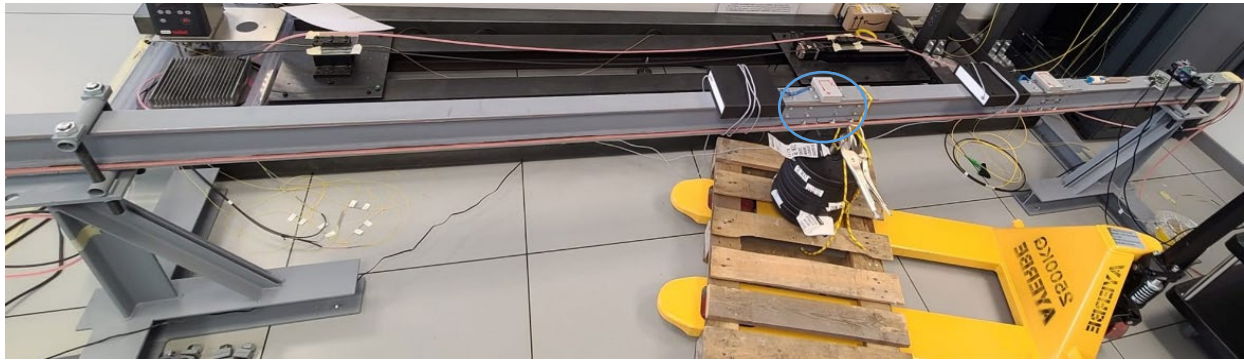
Un cable de fibra óptica de 150 m fue adherido a las alas superior e inferior de la viga mediante resina epoxi, proporcionando ocho puntos de medición distribuidos a lo largo de la estructura. Este sistema se conectó a un interrogador DAS capaz de capturar datos con una resolución espacial de 1.5 m y una frecuencia de muestreo de 1 kHz. Los puntos de medición permitieron analizar deformaciones dinámicas y cambios en la frecuencia propia. La disposición del cable y la configuración del interrogador se representan en la Figura 1.c.

2.3 Instrumentación con acelerómetros LARA

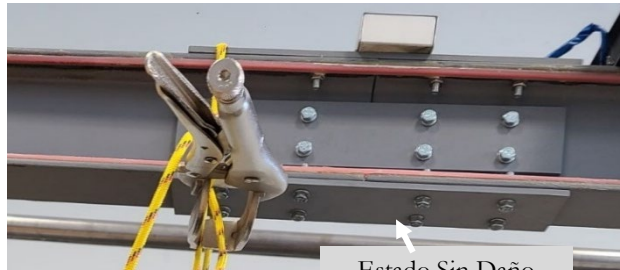
Para complementar las mediciones del DAS, se instalaron dos acelerómetros LARA en la viga, uno en la sección media (LARA 1) y otro en un cuarto de la longitud (LARA 2). Estos dispositivos inalámbricos, con una frecuencia de muestreo de 333 Hz y una densidad de ruido de $51 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, se configuraron para iniciar automáticamente la adquisición de datos al ser conectados.

2.4 Proceso de adquisición de datos

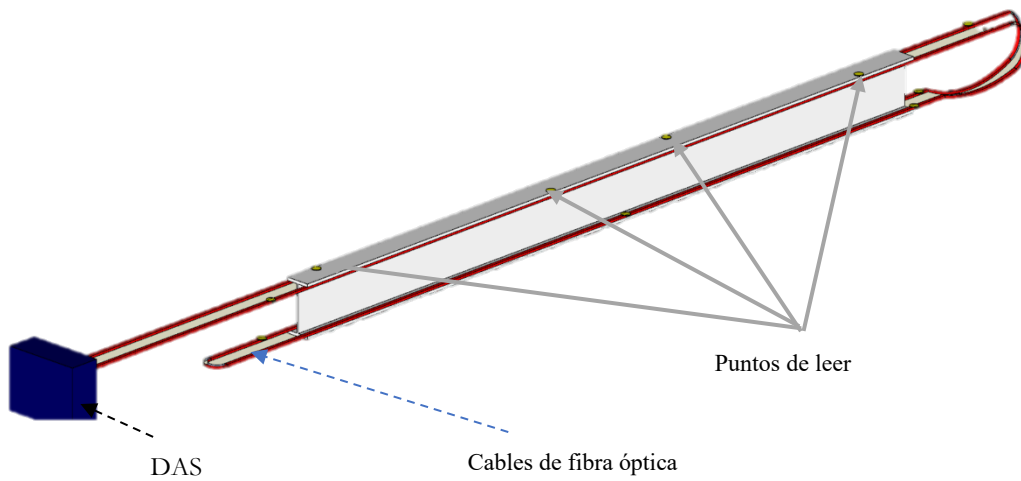
El modelo de viga fue excitado dinámicamente mediante la liberación repentina de un peso de 50 kg desde su punto medio. Los datos obtenidos de los acelerómetros LARA y el interrogador DAS fueron procesados mediante Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) para identificar las frecuencias propias de la estructura. El sistema DAS proporcionó una representación detallada de las vibraciones a lo largo de la longitud de la viga, mientras que los acelerómetros LARA permitieron identificar la orientación de los modos de vibración detectados.



a.



b.



c.

Figura 1. (a) Montaje experimental de la viga de 3.5 m, (b) detalle de los puntos de daño en el medio y 1/4 del vano y (c) Configuración de la fibra óptica y puntos de medición en la viga.

3. Ensayos experimentales y resultados

Los ensayos experimentales se realizaron en un modelo de viga diseñado para evaluar la capacidad de los sensores LARA y DAS para detectar cambios en las frecuencias propias asociados con distintos estados de daño estructural. A continuación, se describen el protocolo experimental, los resultados de los análisis de frecuencia y una comparación de las tecnologías empleadas.

3.1 Protocolo experimental

El modelo de viga fue sometido a excitaciones dinámicas mediante la liberación súbita de un peso de 50 kg desde el punto medio de la estructura. Este método permitió inducir vibraciones en la viga, que luego fueron registradas por los sensores LARA y el sistema DAS.

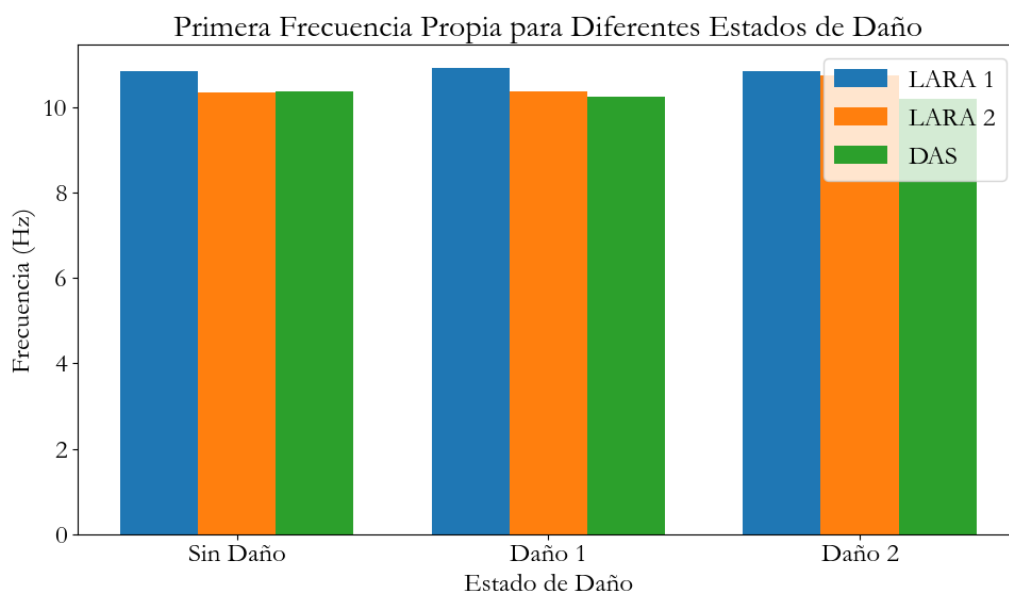
Se consideraron tres configuraciones para los ensayos:

1. **Sin daño:** Todas las placas atornilladas permanecieron en su lugar.
2. **Daño 1:** Se retiró una placa en el centro luz de la viga.
3. **Daño 2:** Se retiraron placas en el centro luz y en un cuarto de la longitud de la viga.

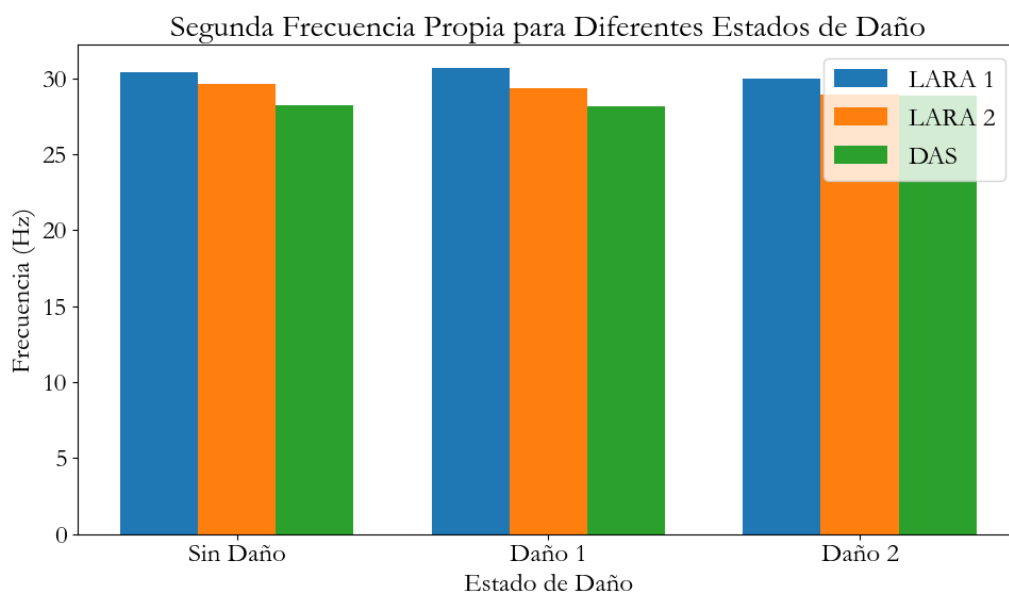
Los datos registrados por los sensores fueron procesados mediante Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) para identificar las frecuencias propias en cada configuración. Los resultados obtenidos permitieron analizar la sensibilidad de cada tecnología frente a los cambios en la rigidez estructural.

3.2 Resultados de análisis de frecuencias propias

Los resultados del análisis de frecuencias propias se presentan en la Figura 2, que muestra tanto la primera como la segunda frecuencia propia para cada estado de daño.



a.



b.

Figura 2. (a) Primera y (b) segunda frecuencia propia para distintos estados de daño

Las gráficas evidencian una disminución de las frecuencias propias a medida que se incrementa el nivel de daño:

En la primera frecuencia propia, LARA 1 muestra una disminución del 4.5% al pasar del estado sin daño (10.85 Hz) al estado con dos patologías (10.37 Hz).

DAS presenta un cambio más notable entre el estado sin daño (10.86 Hz) y el estado con dos daños (10.20 Hz), lo que representa una disminución del 6.1%.

De manera similar, la segunda frecuencia propia muestra una reducción del 7.2% para LARA 2 (de 30.67 Hz sin daño a 28.19 Hz con dos daños). DAS evidencia una reducción del 3.5% en el mismo intervalo (de 29.95 Hz a 28.89 Hz).

3.3 Análisis comparativo

El análisis comparativo entre LARA y DAS destaca lo siguiente:

La diferencia máxima entre las mediciones de LARA y DAS fue inferior al 4%, lo que demuestra que ambas tecnologías ofrecen alta

precisión para la detección de cambios en las frecuencias propias.

3.4 Propuesta de integración LARA-DAS

Estos hallazgos destacan el potencial de LARA como un sistema capaz de indicar posibles daños estructurales mediante la detección de cambios en las frecuencias propias. Aunque el presente estudio aplica ambas estrategias de medición de manera separada para identificar las frecuencias naturales de la viga, establece una base sólida para investigaciones futuras.

La próxima fase de este estudio se centrará en la implementación práctica de la estrategia combinada LARA-DAS, lo cual incluirá:

1. El desarrollo de algoritmos para el disparo en tiempo real y la fusión de datos.
2. Estudios comparativos para evaluar el desempeño de la estrategia combinada frente a otras aplicaciones existentes de SHM, con un análisis detallado de las mejoras en precisión, eficiencia energética y eficiencia computacional proporcionadas por el sistema integrado.

La integración de LARA como sistema de disparo para DAS presenta varias ventajas notables:

1. Reducción del consumo energético: El sistema de disparo puede contribuir a un menor consumo energético, ya que permite un posprocesamiento más enfocado únicamente cuando se detecta una anomalía

2. Mejora en la eficiencia computacional: Este enfoque puede reducir los requerimientos computacionales, optimizar el proceso de análisis y hacer que el manejo de grandes volúmenes de datos sea más eficiente.

3. Robustez mejorada: El sistema se vuelve más robusto al integrar múltiples tecnologías.

4. Versatilidad: LARA es una solución de acceso abierto basada en código Python de código abierto, lo que permite su integración con diversos sistemas. Este enfoque combinado puede adaptarse a varios diseños y condiciones de puentes, proporcionando una solución integral de SHM que puede realizar análisis de frecuencias propias, detección de daños, localización de daños y análisis de modos de vibración.

4. Conclusiones

Este estudio evaluó la integración del sensor LARA y el sistema DAS en un modelo de viga con daños inducidos, para detectar cambios en las frecuencias propias asociados con la variación en la rigidez estructural. Los resultados obtenidos permiten extraer las siguientes conclusiones:

Eficacia de los sensores LARA y DAS: Ambos sistemas demostraron ser capaces de identificar variaciones en las frecuencias propias de la estructura en función de los estados de daño. Las mediciones de LARA presentaron una diferencia máxima del 4% en comparación con DAS, evidenciando su alta precisión como una alternativa de bajo costo.

Reducción de la rigidez estructural: Los resultados experimentales mostraron que la eliminación de placas en la viga disminuyó las frecuencias propias de manera consistente. En el caso del estado con dos daños, la primera frecuencia propia disminuyó hasta un 6.1% en comparación con el estado sin daño.

Impacto en el monitoreo de salud estructural (SHM): La combinación de LARA como sistema de disparo y DAS como herramienta analítica permitió optimizar las demandas computacionales del monitoreo, manteniendo una alta precisión en las mediciones. Este enfoque presenta un gran potencial para aplicaciones en SHM de infraestructuras civiles.

Recomendaciones futuras:

Este estudio sienta las bases para investigaciones futuras centradas en la implementación práctica de la estrategia combinada LARA-DAS. Las próximas etapas incluirán:

El desarrollo de algoritmos para el disparo en tiempo real y la fusión de datos.

Estudios comparativos que evalúen la eficacia de este sistema integrado frente a estrategias de monitoreo estructural existentes.

Análisis de las mejoras en precisión, eficiencia energética y computacional proporcionadas por este sistema integrado.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los proyectos PID2021-126405OB-C31 y PID2021-126405OB-C32, financiados por los fondos FEDER "A way to make Europe" y el Ministerio de Economía y Competitividad de España MICIN/AEI/10.13039/501100011033/. El Dr. Seyedmilad Komarizadehasl agradece la beca otorgada por la Universidad Politécnica de Cataluña para fomentar la investigación entre el nuevo personal docente, con referencia ALECTORS-2023.

Referencias

- [1] S. Bahmanoo, M. Valinejadshoubi, A. Sabamehr, A. Bagchi, and S. Bagchi, **Enhancing the Efficiency of Structural Condition Assessment by Integrating Building Information Modeling (BIM) Into Vibration-Based Damage Identification (VBDI)**, *Structural Health Monitoring* 2019, 0 (0) (2019), pp. 412–419, doi: 10.12783/SHM2019/32142.
- [2] F. Lozano, S. Emadi, S. Komarizadehasl, J. González-Arteaga, and Y. Xia, **Enhancing performance evaluation of low-cost inclinometers for the long-term monitoring of buildings**, *Journal of Building Engineering*, 87 (2024), p. 109148, doi: 10.1016/J.JOBE.2024.109148.
- [3] A. Shrestha, J. Dang, X. Wang, and S. Matsunaga, **Smartphone-Based Bridge Seismic Monitoring System and Long-Term Field Application Tests**, *Journal of Structural Engineering*, 146 (2) (2019), pp. 04019208–04019222, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002513.
- [4] S. S. Pardeshi, A. D. Patange, R. Jegadeeshwaran, and M. R. Bhosale, **Tyre Pressure Supervision of Two Wheeler Using Machine Learning**, *Structural Durability & Health Monitoring*, 16 (3) (2022), pp. 271–290, doi: 10.32604/SDHM.2022.010622.
- [5] S. Komarizadehasl, M. A. G. Jiménez, J. M. P. Casas, J. A. Lozano-Galant, and J. Turmo, **Eigenfrequency analysis using fiber optic sensors and low-cost accelerometers for structural damage detection**, *Engineering Structures*, 318 (2024), p. 118684, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118684.
- [6] S. Komarizadehasl, Y. Xia, M. Komary, and F. Lozano, **Eigenfrequency analysis of bridges using a smartphone and a novel low-cost accelerometer prototype**, *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 2024 18:2, 18 (2) (2024), pp. 202–215, doi: 10.1007/S11709-024-1055-5.
- [7] X. Tan, L. Fan, Y. Huang, and Y. Bao, **Detection, visualization, quantification, and warning of pipe corrosion using distributed fiber optic sensors**, *Automation in Construction*, 132 (2021), p. 103953, doi: 10.1016/J.AUTCON.2021.103953.
- [8] A. Nokhbatolfoghahai, H. M. Navazi, and R. M. Groves, **Evaluation of the sparse reconstruction and the delay-and-sum damage imaging methods for structural health monitoring under different environmental and operational conditions**, *Measurement*, 169 (2021), p. 108495, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2020.108495.
- [9] P. Stajanca, S. Chruscicki, T. Homann, S. Seifert, D. Schmidt, and A. Habib, **Detection of Leak-Induced Pipeline Vibrations Using Fiber—Optic Distributed Acoustic Sensing**, *Sensors* 2018, Vol. 18, Page 2841, 18 (9) (2018), p. 2841, doi: 10.3390/S18092841.
- [10] A. Ozdagli, B. Liu, F. M.-M. S. and S. Processing, and undefined 2018, **Low-cost, efficient wireless intelligent sensors (LEWIS) measuring real-time reference-free dynamic displacements**, Elsevier,
- [11] M. Aguero, A. Ozdagli, and F. Moreu, **Measuring reference-free total displacements of piles and columns using low-cost, battery-powered, efficient wireless intelligent sensors (LEWIS2)**, *Sensors*, 19 (7) (2019), pp. 1549–1566, doi: 10.3390/s19071549.
- [12] Q. Meng and S. Zhu, **Developing iot sensing system for construction-induced vibration monitoring and impact assessment**, *Sensors (Switzerland)*, 20 (21) (2020), pp. 1–24, doi: 10.3390/s20216120.
- [13] K. Y. Koo, D. Hester, and S. Kim, **Time synchronization for wireless sensors using low-cost gps module and arduino**, *Frontiers in Built Environment*, 4 (2019), p. 82, doi: 10.3389/FBUIL.2018.00082/BIBTEX.

