TECNIACÚSTICA
XIV Congreso Ibérico de Acústica
57º Congreso Español de Acústica
Granada, 21–23 de octubre de 2026

DETECCIÓN DE FUGAS EN DEPÓSITOS DE AGUA MEDIANTE HIDRÓFONOS ACÚSTICOS BASADOS EN REDES DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA

Eduardo Ruiz Pérez [1,*], Arturo Aguirre Pina [1], David Zaplana Martínez [1], Antonio Sánchez García [1], Juan Antonio Sánchez García [1], Javier Madrigal Madrigal [2], Luis Alberto Sánchez Domínguez [3], Ramón Miralles Ricós [2]

[1] Sociedad Anónima de Electrónica Submarina (SAES), Cartagena, España
[2] Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM), Universitat Politècnica de València, Valencia, España
[3] Cálculo y Estructuras Sensadas (CalSens),Valencia, España

[*] Autor de correspondencia: e.ruiz@electronica-submarina.com

Resumen. La detección temprana de fugas en infraestructuras hidráulicas críticas, como presas o depósitos, es esencial para prevenir daños graves y optimizar su mantenimiento. Este trabajo presenta resultados de los ensayos con hidrófonos de fibra óptica con redes de Bragg (FBG) para la detección de señales de fuga de agua. La metodología combinó mediciones in situ en un depósito con fuga real, destinadas a caracterizar la señal acústica asociada, y ensayos controlados en laboratorio en los que se compararon distintos prototipos FBG con un hidrófono convencional de referencia. Los resultados mostraron que la fuga generaba señales de amplitud extremadamente baja, apenas distinguibles del ruido de fondo, lo que constituyó un reto significativo para la detección. Tras una evaluación inicial de varios prototipos FBG, se seleccionó el más equilibrado para ensayos posteriores, aunque su sensibilidad se consideró insuficiente para detectar la fuga real.

Palabras clave: *fugas de agua, hidrófonos FBG, fibra óptica, localización acústica subacuática*

Abstract. Early detection of leaks in critical hydraulic infrastructures, such as dams or water tanks, is essential to prevent severe damage and to optimise maintenance. This paper reports experimental results obtained with fibre Bragg grating (FBG) optical hydrophones for the acoustic detection of water-leak signals. The methodology combined in situ measurements in a tank with an actual leak, aimed at characterising the associated acoustic signature, and controlled laboratory tests where several FBG prototypes were compared against a conventional reference hydrophone. The results showed that the leak produced extremely low-amplitude signals, barely distinguishable from the background noise, which represents a significant detection challenge. After the preliminary evaluation of several FBG prototypes, the most balanced configuration was selected for subsequent tests, although its sensitivity was considered insufficient for reliable detection of the real leak.

Keywords: *water leaks, FBG hydrophones, optical fibre, underwater acoustic localisation*

Copyright: © 2026 Apellido1 et al. Distribuido bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

1. Introducción

La monitorización acústica de infraestructuras hidráulicas permite abordar la detección temprana de fugas a partir de señales generadas por el flujo de agua a través de discontinuidades o filtraciones. En el contexto del reto MIC (Monitorización de Infraestructuras Críticas) del programa CAETRA (programa de tecnologías de uso dual organizado por el Instituto de Fomento de la Región de Murcia – INFO), se evaluó el uso de sensores de fibra óptica para infraestructuras hidráulicas sumergidas, con especial atención a depósitos, presas y conducciones de agua. El trabajo se centró en hidrófonos basados en redes de Bragg en fibra óptica (FBG), por su potencial para implementar mediciones acústicas puntuales o quasi-distribuidas mediante multiplexación en longitud de onda.

El objetivo de este artículo es recoger los ensayos realizados en el proyecto para caracterizar la señal acústica de una fuga real y evaluar la capacidad de distintos prototipos FBG frente a un hidrófono convencional de referencia. En coherencia con el resumen presentado, el énfasis se sitúa en la dificultad de detectar señales de fuga de muy baja amplitud y en las implicaciones de esta limitación para el diseño de futuros sensores.

2. Materiales y métodos

En un primer momento se consideró en el proyecto el uso de un sistema DAS (o Distributed Acoustic Sensing), basado en fibra óptica sin modificar, pero se descartó durante la fase de estudios dada su limitación en longitudes mínimas (los DAS contemplan longitudes de fibra del orden de kilómetros) y en la mayor sensibilidad del FBG para su frecuencia de diseño. Todo ello lleva a la posibilidad de sistemas de menor escala y con un coste más controlado para escenarios de dimensiones reducidas.

2.1. Sensores basados en fibra óptica aplicados a estructuras

El funcionamiento de los sensores de fibra óptica se basa en la variación de las propiedades ópticas de la fibra ante magnitudes físicas como temperatura o vibración. Un transmisor envía luz por la fibra, esta se modula según la magnitud medida y un receptor interpreta dicha variación para obtener la medida correspondiente.

Un ejemplo son los sensores distribuidos de temperatura en fibra óptica (DTS, *Distributed Temperature Sensing*), ya utilizados para detectar fugas en presas de materiales sueltos, como Soto-Terroba y Yesa [1]. También podrían aplicarse al control térmico del hormigón en el cuerpo de la presa.

Este método identifica fugas mediante estrés térmico del cable DTS, o *Heat Pulse Method* (ver **Figura** 1). Primero se calienta el sensor mediante el par de cobre integrado en el cable y, después, se registra el retorno de la fibra a su temperatura inicial al interrumpir el aporte de calor.

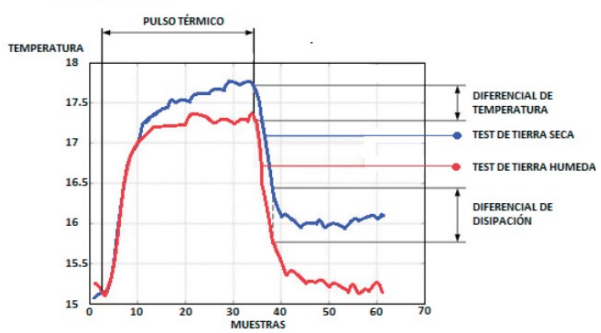


Figura 1 – Medición de diferencia de gradiente de temperatura generado por fuga de agua.

Otro ejemplo son los sistemas de Detección acústica distribuida y de Detección distribuida de la vibración (DAS), que detectan vibraciones y capturan la energía acústica a lo largo de la fibra óptica. Se basan en la variación sobre una señal de luz pulsada que la deformación de la fibra genera y utilizan algoritmos de clasificación para detectar y localizar eventos tales como fugas, fallas de cables, actividades de intrusión u otros sonidos anormales [2].

Aun cuando estos sistemas se han aplicado a escenarios concretos relacionados con infraestructuras objeto del proyecto, se pretende analizar con mayor detalle la aplicabilidad de estos sistemas, tanto evaluando aplicaciones existentes como otros elementos de medición de estas estructuras que sean susceptibles de la aplicación de estos sensores.

2.2. Principio de medida con redes de Bragg en fibra

Los sensores FBG son sensores ópticos intrínsecos basados en rejillas de Bragg grabadas en la fibra óptica [3]. La longitud de onda reflejada depende de las variaciones de deformación y temperatura. Cuando una onda acústica o una vibración incide sobre la estructura que acopla el medio acuático con la fibra, la deformación dinámica modula la longitud de onda reflejada [4] (ver **Figura 2**). Un interrogador óptico registra dicho desplazamiento temporal, permitiendo extraer información de amplitud y frecuencia. A diferencia de un hidrófono eléctrico, que entrega variaciones de tensión, el hidrófono FBG registra desplazamientos ópticos, lo que condiciona la comparación directa de niveles absolutos.

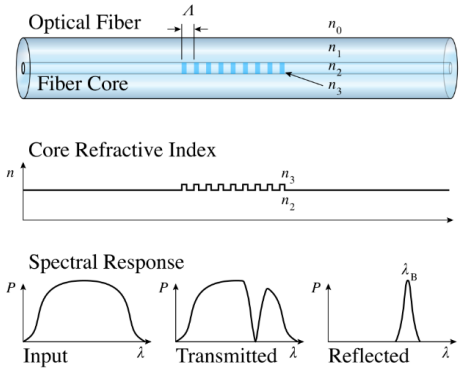


Figura 2 – Estructura de rejilla de Bragg en fibra y respuesta espectral asociada.

2.3. Instrumentación

Como referencia acústica para las mediciones y pruebas de las FBG en laboratorio, se utilizó un hidrófono comercial Abyssens Dori M (ver **Figura 3**), con ancho de banda de 2 Hz–30 kHz, rango dinámico de 110 dB, ganancia configurable de 0 dB o 12 dB, nivel acústico máximo de 185 dB, frecuencia de muestreo de 125 kHz y sensibilidad de −185 dB re 1 V/µPa.



Figura 3 - Hidrófono comercial Abyssens Dori M.

Frente a ese hidrófono se evaluaron cuatro prototipos de hidrófonos FBG (HFBG), mostrados en la **Figura 4**, denominados B2, C1, DA1 y A1. La diferencia principal entre ellos radicaba en el elemento mecánico/acústico empleado para transferir la presión o vibración del agua a la fibra, actuando como adaptador de impedancia.



Figura 4 – Prototipos de hidrófonos FBG (de izquierda a derecha: B2, C1, DA1, A1).

En los ensayos de laboratorio se emplearon sistemas de emisión acústica submarina para generar señales reproducibles. Para la evaluación de prototipos se usó un sistema de altavoces subacuáticos, mientras que para las pruebas de localización se utilizó un transductor submarino omnidireccional. La **Figura 5** muestra estos equipos.



Figura 5 – Altavoz submarino (izquierda) y transductor acústico submarino omni Gavial ITC-1001 (derecha).

También se incorporó un hidrófono interferométrico (HI) en la tercera fase, con el fin de comparar su sensibilidad con respecto a los sensores FBG.

2.4. Diseño experimental

La metodología se estructuró en tres fases, que quedan resumidas en la **Tabla** 1.

Tabla 1 **–** Síntesis del diseño experimental.

Fase	Objetivo	Configuración principal	Magnitudes evaluadas
1	Caracterizar una fuga real	Depósito de Coronada e hidrófono de referencia	Bandas espectrales y SNR frente a ruido de fondo
2	Comparar prototipos FBG	Piscina de pruebas, prototipos B2, C1, DA1 y A1 frente a HR	Respuesta en frecuencia, PSD normalizada y sensibilidad relativa
3	Evaluar localización acústica	Tres HFBG multiplexados, HI y fuente en cinco posiciones	Estimación de posición y efecto de reflexiones

La fase 1 consistió en una medición in situ en el depósito de Coronadas (ver **Figura 6**), mediante un barrido espacial con el hidrófono de referencia para localizar, identificar y caracterizar la firma acústica de una posible fuga. La no disponibilidad de la instalación impidió realizar mediciones posteriores.



Figura 6 – Interior del depósito donde se realizó la medición de la Fase 1.

La segunda fase evaluó, en entorno controlado, el desempeño relativo de los prototipos FBG mediante ruido blanco, chirps y tonos senoidales de amplitud decreciente. La **Figura 7** muestra esquemáticamente el planteamiento del entorno de pruebas de la segunda fase.

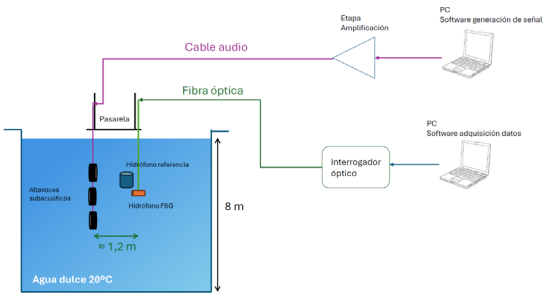


Figura 7 - Montaje empleado para la evaluación relativa de prototipos FBG en la Fase 2.

La tercera fase empleó el prototipo más equilibrado para ensayos de localización con tres hidrófonos FBG multiplexados en una única fibra óptica y un hidrófono interferométrico, tal como se muestra en el esquema de la **Figura 8**

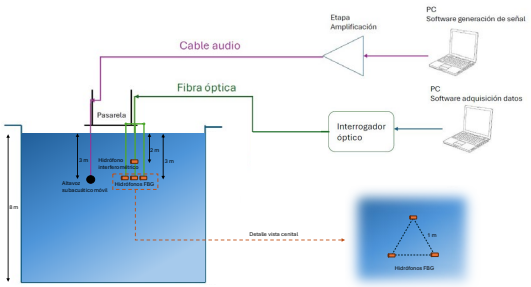


Figura 8 – Montaje empleado en las pruebas de localización acústica de la Fase 3.

Para comparar las señales del hidrófono y los sensores FBG se aplicó un preprocesado común: diezmado de la señal de referencia para aproximar las frecuencias de muestreo, filtrado paso banda entre 70 Hz y 5 kHz y cálculo de la relación señal a ruido (Singal to Noise Ratio o SNR) frente al ruido de fondo y normalización de la PSD (Power Spectral Density o Densidad Espectral de Potencia) a su máximo, para evitar comparar directamente magnitudes físicas distintas.

1. Resultados y discusión

1.1. Caracterización de la fuga real

La campaña in situ permitió identificar en el sector A2 del depósito (dividido en 19x5 sectores) un sonido descrito como "gorgoteo", asociado a la posible fuga. El análisis espectral mostró componentes casi continuas alrededor de 500 Hz, 1419 Hz y 1877 Hz, con anchuras de banda aproximadas de 400 Hz, 200 Hz y 200 Hz, respectivamente (ver **Figura 9**, izquierda). Para estimar el contraste de la fuga se tomó como referencia una grabación de ruido de fondo en el sector A5 y se calculó un espectrograma normalizado (ver **Figura 9**, derecha).

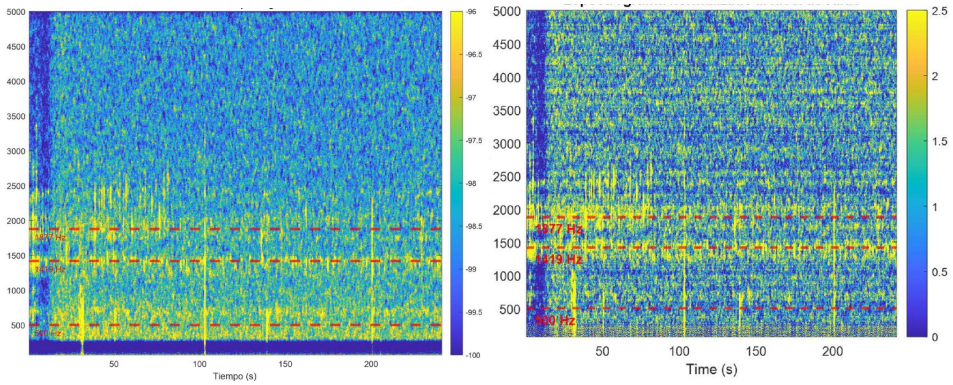


Figura 9 – Espectrogramas de la señal en el sector A2 (izquierda) y de la fuga en sector A5 (derecha).

Aunque las tres bandas aparecen de forma continuada en el registro, la SNR media se situó entre 1 dB y 2 dB según la banda, con picos aislados atribuibles a eventos accidentales durante la medida. Esto confirma que la señal real de fuga se encuentra muy próxima al ruido de fondo, lo que exige sensores suficientemente sensibles en la banda de interés.

1.2. Evaluación de prototipos FBG

Los cuatro prototipos FBG detectaron señales de laboratorio de muy baja amplitud en la mayor parte de las frecuencias evaluadas. No obstante, la SNR obtenida dependió claramente de la respuesta en frecuencia de cada diseño. El prototipo B2 presentó un comportamiento global equilibrado y fue seleccionado para la fase posterior, pese a ofrecer una SNR inferior a la del hidrófono de referencia. En la prueba con ruido blanco (ver **Figura 10**), tanto el prototipo como el hidrófono de referencia presentaron máximos en torno a 2300 Hz, mientras que en los ensayos de sensibilidad se observó que B2 respondía mejor cerca de sus zonas resonantes, especialmente alrededor de 2200 Hz–3200 Hz.

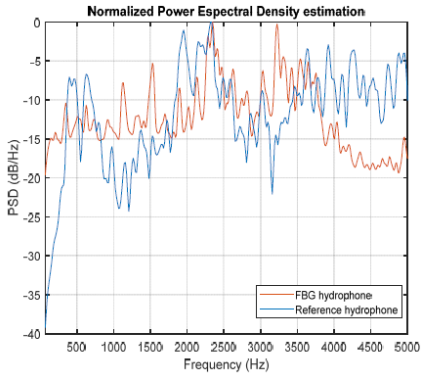


Figura 10 – PSD normalizada del prototipo B2 comparada con el hidrófono de referencia.

La comparación entre sensores no debe interpretarse como una equivalencia directa de presión acústica, ya que el hidrófono convencional mide tensión eléctrica y el FBG desplazamiento de longitud de onda. Por ello, la evaluación se planteó en términos relativos, considerando la detección de patrones espectrales, el contraste frente al ruido y la estabilidad de la respuesta. La diferencia de SNR frente al hidrófono de referencia confirma que los prototipos constituyen una primera aproximación funcional, pero con sensibilidad todavía insuficiente para la detección de la fuga real observada en campo.

1.3. Localización acústica y efecto de las reflexiones

En la tercera fase se utilizó una geometría de tres hidrófonos FBG, sumergidos a 3 m y configurados como un triángulo equilátero de 1 m de lado. El hidrófono interferométrico se situó entre dos de los HFBG a 2 m de profundidad. El algoritmo de localización funcionó adecuadamente con señales de banda ancha de nivel suficiente, mientras que su rendimiento empeoró con señales de banda estrecha. Por ello, el análisis se centró en reproducir la señal de fuga real grabada durante la fase de campo. La **Figura 11** muestra este despliegue en la piscina de pruebas de las instalaciones de SAES.

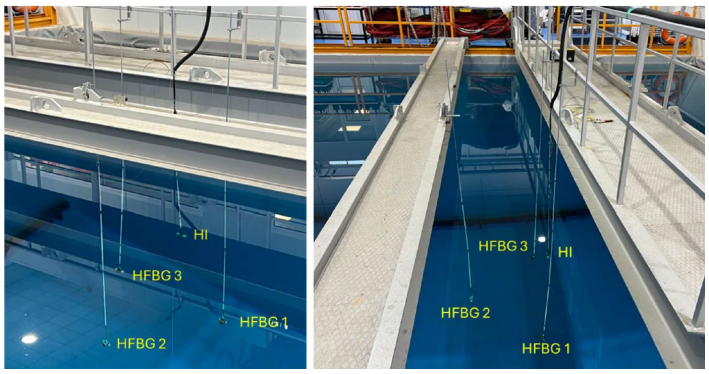


Figura 11 – Disposición de los hidrófonos dentro de la piscina de pruebas durante la Fase 3.

La localización fue satisfactoria en varias posiciones, pero presentó errores cerca del perímetro de la piscina debido a reflexiones, superposición de trayectorias e interferencias. Las simulaciones confirmaron que el algoritmo funciona en campo libre, mientras que en entornos reverberantes aparecen máximos espurios que desplazan la estimación. La **Figura 12** muestra un caso correcto (P2) y otro con error por efecto espejo (P3). En el sistema final, este efecto podría reducirse o eliminarse aumentando el número de hidrófonos, o ser menor por las mayores dimensiones del entorno.

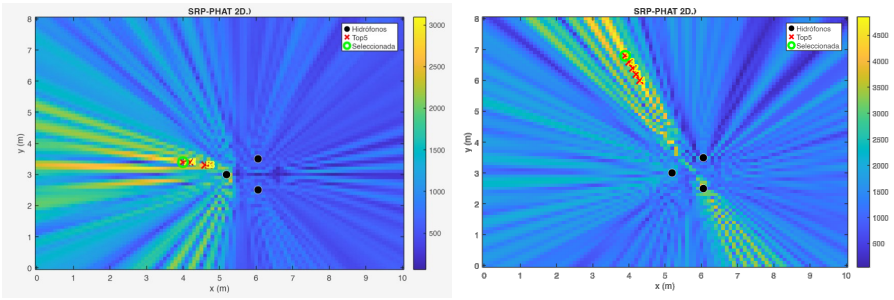


Figura 12 – Resultado del algoritmo en P2 (izquierda) y P3 (derecha).

1.4. Resultados del hidrófono interferométrico (HI)

Como se ha comentado anteriormente, durante la fase 3 de pruebas se incorporó un hidrófono interferométrico (HI) para registrar las señales recibidas por éste de forma simultánea a los tres HFBG, de forma que se pudiese realizar una comparación entre ambas tecnologías (ver **Figura 13**).

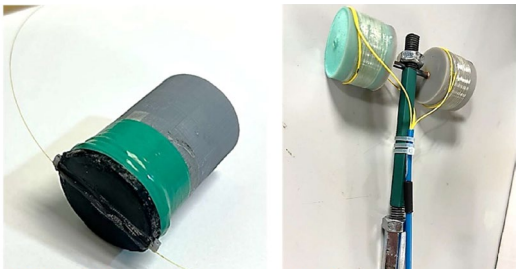


Figura 13 – Hidrófono FBG (izquierda) e hidrófono interferométrico (derecha).

Para comparar la detección acústica con los HFBG y el HI, se analizaron ensayos iniciales de la fase 3 con la fuente en posiciones definidas por SAES. Se empleó un chirp lineal de 80 Hz a 5 kHz, amplitud fija de nivel 10 y adquisición simultánea con todos los hidrófonos.

En la **Figura 14** se muestra un análisis comparativo para uno de los ensayos de las señales recibidas por el HI (color verde) y los 3 HFBG (colores amarillo, azul y rojo), para dos niveles distintos de la señal generada. En ella se aprecia claramente que para el nivel de señal menor (izquierda) no aparecen las señales de los HFBGs, que sí aparecen en el nivel de señal mayor (derecha), pero con unos niveles muy inferiores al HI.

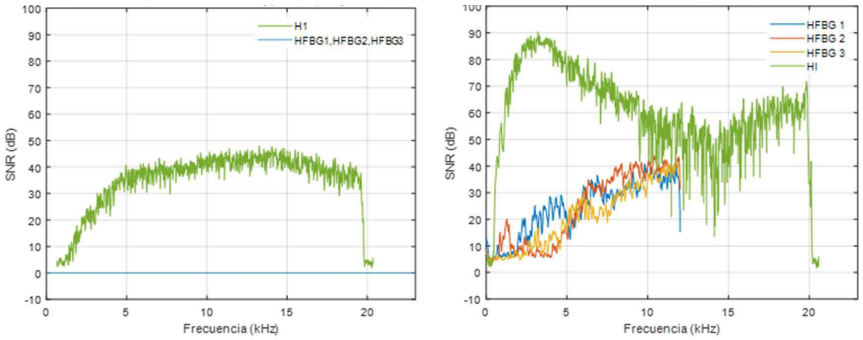


Figura 14 – Curvas de SNR obtenidas en el caso 2 con amplitudes mínima 1 y media-baja 2.5.

El análisis global mostró que los HFBG no detectan chirps muy débiles, mientras que el HI alcanza una SNR ≈ 40 dB. A amplitud baja (1,5), el HI supera a los HFBG en más de 60 dB. Con mayor amplitud, ambos detectan la señal, aunque el HI puede presentar armónicos, artefactos y desvanecimientos por saturación. Sin saturación, el HI ofrece una respuesta más limpia y uniforme hasta 20 kHz.

En conclusión, el hidrófono interferométrico resulta más adecuado para detectar señales débiles y caracterizar banda ancha, siempre que se evite la saturación.

2. Conclusiones y Futuros Trabajos

Los ensayos demostraron que una fuga real en un depósito puede generar una señal acústica continua en bandas específicas, pero con una SNR media muy baja, del orden de 1 dB–2 dB. Esta condición impone un requisito exigente de sensibilidad al sensor y al esquema de interrogación.

Los prototipos FBG detectaron señales controladas de baja amplitud, pero su respuesta dependió de la resonancia de cada diseño. El B2 fue seleccionado por su mejor compromiso global, aunque su sensibilidad no garantiza la detección de la fuga real medida en campo. Esto lleva a que se considere apropiado trabajar en alternativas de mejor sensibilidad, como el hidrófono interferométrico, que mostró mayor sensibilidad durante las mediciones realizadas en la fase 3, que los FBG B2 utilizados.

La localización acústica con tres HFBG multiplexados es viable con señales de banda ancha e intensidad suficiente. Sin embargo, las reflexiones del entorno afectan a la estimación cerca de límites físicos, por lo que deberán mitigarse mediante mejoras del algoritmo, la geometría de despliegue y el modelado del entorno.

Como líneas de trabajo prioritarias se recomienda optimizar geometría, materiales y frecuencia de resonancia de los sensores FBG; mejorar el esquema de interrogación y calibración en banda; ampliar la caracterización de ruido real en depósitos; y completar la validación comparativa con hidrófonos interferométricos en condiciones representativas.

Las investigaciones futuras deberán reducir la brecha entre la detección en laboratorio y la detección robusta en operación. Para ello, se requieren campañas más largas en depósitos reales, que permitan caracterizar mejor la señal de fuga, ajustar el diseño de los HFBG en las frecuencias relevantes y optimizar algoritmos de detección y localización frente a reflexiones, reverberación y variaciones espaciales del campo acústico.

Asimismo, se considera relevante profundizar en el diseño de arquitecturas multiplexadas de sensores FBG con mayor sensibilidad en las bandas espectrales identificadas (y posiblemente más concretas tras las campañas de medición adicionales), así como avanzar hacia un prototipo integrado que incorpore adquisición, procesado automático, visualización de resultados y generación de alertas, permitiendo aproximarnos a un sistema completo de monitorización de infraestructuras hidráulicas críticas.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado parcialmente por el Instituto de Fomento de la Región de Murcia (INFO), enmarcado dentro del programa CAETRA.

Agradecer la colaboración de la Mancomunidad de los Canales del Taibilla para las mediciones realizadas durante este proyecto en sus instalaciones.

El trabajo en los hidrófonos ópticos (HFBG y HI) ha contado con el apoyo de los proyectos PID2023-152314OB-I00 (financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE) y TED2021-131148B-I00 (financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y UE 'NextGenerationEU'/PRTR) y de la Ayuda PTQ2023-013004 (financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033).

Referencias

[1] Muñoz, O., Gómez, R., Russo, B., Sánchez, J. C., "Sistema de detección de fugas en tiempo real en presas de materiales sueltos mediante sensores distribuidos en fibra óptica", 2016, IWA Publishing, Editorial UPV, FFIA 4450-18327-1-PB.pdf (upv.es)

[2] J. S. Sanguino-Lemus, G. A. Hernández-Martínez, K. C. Puerto-López, "Monitoreo estructural basado en sistemas de sensores de fibra óptica" Revista de Ingenierías Interfaces, vol. 3, no. 2, pp.73-97, 2020. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8661420.pdf

[3] K. O. Hill, G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview " in Journal of Lightwave Technology, vol. 15, no. 8, pp. 1263-1276, 1997, doi: 10.1109/50.618320

[4] M. Hadeed, H. S. Bhatti, A. M. Aizzuddin, E. Vorathin, y H. Mohamad, "Review of fibre optic hydrophones for potential application in offshore carbon storage monitoring" Sensors and Actuators A: Physical, vol. 386, p. 116341, 2025. doi:10.1016/j.sna.2025.116341