



Revista de

acústica

Vol. 56 | Núms. 3 y 4 | 3.^{er} y 4.^o Trimestres 2025

Publicación periódica de la Sociedad Española de Acústica, SEA



Validando
acelerómetros
de *smartwatches*
para el análisis
preciso del
movimiento
Página 3

Ruido de drones
ligeros: desafíos
experimentales
de la norma EASA
Página 14

Detección acústica
submarina mediante
fibra óptica y cables
bobinados
Página 21

Beamforming
invariante
en frecuencia
mediante Autograd
y *arrays* circulares
Página 27

Un siglo de medición
de ruido: la
evolución hacia
el decibelio
Página 36



TECNIACÚSTICA

21-23 OCTUBRE 2026 | Granada, España



Cierre de recepción de resúmenes:

15 de mayo de 2026

Cierre de recepción de comunicaciones
con resumen aceptado:

7 de septiembre de 2026



Revista de Acústica

Publicación periódica de la Sociedad Española de Acústica, SEA

Portada: Fotografía de un dron hovering en la cámara anecoica de la Universidad Carlos III de Madrid. (Cortesía de Daniel de la Prida)

Edita

Sociedad Española de Acústica, SEA
www.sea-acustica.es
secretaria@sea-acustica.es

Director

Daniel de la Prida Caballero
revista@sea-acustica.es

Administración, suscripciones y publicidad

secretaria@sea-acustica.es

Comité de redacción

María Larrosa Navarro, Ana Delgado Portela, Jaime Ramis Soriano, María Ángeles Navacerrada, Jesús Alba Fernández, Noé Jiménez, Jerónimo Vida

Maquetación e impresión

Bayron Realización Gráfica, S. L.
www.bayron.es

Suscripción anual

España: € 50
Extranjero: € 70

Tarifas publicidad

Una página color € 600

Depósito legal

M-19769-1970

I.S.S.N.

0210-3680 (versión impresa)
2254-2396 (versión digital)



La **Revista de Acústica**, así como todos los artículos e ilustraciones publicados, están protegidos por las leyes de la propiedad intelectual. No obstante, se permite a los autores de los artículos la reutilización de los trabajos publicados con fines no comerciales, incluyendo el depósito de la versión final de la revista en repositorios institucionales, temáticos o páginas web personales, inmediatamente después de su publicación. El resto de la información contenida en la Revista puede reproducirse siempre que se cite la procedencia.



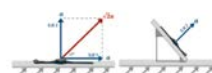
Revista de acústica

Publicación periódica de la Sociedad Española de Acústica, SEA

Sumario

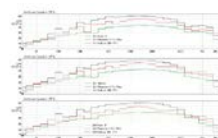
- 3 Estudio comparativo de la respuesta en frecuencia de acelerómetros en relojes inteligentes aplicado a la evaluación del movimiento humano**

María Centeno-Cerrato, Carlos Polvorinos-Fernández, Guillermo de Arcas, Luis Sigcha e Ignacio Pavón



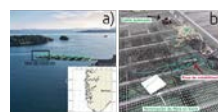
- 14 Mediciones a pie de campo siguiendo las directrices de la EASA sobre mediciones de ruido de vehículos aéreos no tripulados de menos de 600 kg**

Pablo Miguel Ayala, Laura Estévez-Mauriz, Carlos Romero-Romero y Antonio J. Torija



- 21 Detección de sonido subacuático con un cable de fibra óptica suspendido verticalmente y sensores acústicos distribuidos**

Julián Peláez Quiñones, Peter J. Thomas, Steinar Bjørnstad y Per Lunde



- 27 Beamforming invariante en frecuencia en elevación y acimut utilizando Autograd y arreglos concéntricos circulares de micrófonos**

Jorge Ortigoso-Narro, Jose A. Belloch, Máximo Morales-Céspedes, Máximo Cobos



- 36 Centenario de la primera medición de ruido. Desde el decibel y el fono hasta el decibelio**

Walter Alfredo Montano Rodríguez



- 47 Resumen del Congreso Forum Acusticum/ Euronoise 2025**



- 52 Tesis**

- 57 Publicaciones**

- 64 Novedades técnicas**

- 72 Normativa**

- 73 Noticias**

- 78 In Memoriam**

- 80 Agenda**

TRACK-NOISE

ACÚSTICA - AUDIO - RUIDO - VIBRACIONES



Sonómetros y analizadores de audio

Micrófonos Clase 1 y Clase 2

Sistemas de localización sonora 2D y 3D

Acoustic Cameras portátiles

Software de simulación acústica

Monitorización de ruido, vibraciones y AQ

Fuentes de ruido y máquinas de impacto

Unidades de localización sonora 24/7



Prueba gratis el nuevo sw de simulación acústica **Treble** en este enlace :



<https://www.treble.tech/treble-tracknoise>

www.track-noise.com

info@track-noise.com

Estudio comparativo de la respuesta en frecuencia de acelerómetros en relojes inteligentes aplicado a la evaluación del movimiento humano

Comparative study of the frequency response of smartwatch sensors for human movement assessment



María Centeno-Cerrato^{1*}, Carlos Polvorinos-Fernández¹, Guillermo de Arcas¹, Luis Sigcha², Ignacio Pavón¹

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada, ETS de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

² Department of Physical Education and Sports Science, Health Research Institute, & Data-Driven Computer Engineering (D2iCE) Group, University of Limerick, Limerick, Ireland

* Contacto: maria.centeno.cerrato@upm.es

Resumen

Los relojes inteligentes son dispositivos *wearables* diseñados para la recogida continua y precisa de datos. Su capacidad para medir el movimiento los hace especialmente eficaces en aplicaciones como la monitorización de la salud o la evaluación de riesgos laborales. Sin embargo, los sensores inerciales integrados en estos dispositivos pueden presentar imprecisiones en la adquisición de datos, lo que podría comprometer la calidad de los resultados. Por ello, resulta fundamental una caracterización que permita comprender su respuesta bajo condiciones específicas de excitación.

Este estudio evalúa el rendimiento de los acelerómetros en cuatro relojes inteligentes disponibles en el mercado, mediante el análisis de su respuesta en frecuencia empleando dos métodos de calibración diferentes. El Método 1, considerado como referencia y que implica la calibración individual de cada sensor, mostró desviaciones mínimas, validando así la fiabilidad de los dispositivos dentro de los rangos ensayados. En cambio, el Método 2, ideado para una calibración más rápida de múltiples dispositivos, presentó mayores desviaciones debido a las limitaciones inherentes al proceso de calibración.

Los resultados mostraron variaciones en el rendimiento en función del método de calibración utilizado, destacando la necesidad de emplear una técnica apropiada para obtener mediciones más precisas y fiables, especialmente en aplicaciones críticas como la monitorización del movimiento humano.

Palabras clave: calibración, acelerómetro, *wearables*, monitorización de movimiento humano.

Abstract

Smartwatches are wearable devices designed for continuous and precise data collection, ensuring minimal disruption or discomfort for the user. Their ability to monitor movement makes them particularly effective for applications such as health monitoring or workplace risk evaluation. However, the inertial sensors embedded in these devices may exhibit inaccuracies in data acquisition, which could compromise the quality of the results. Therefore, thorough characterization is essential to understand their response under specific excitation conditions.

This study evaluates the performance of accelerometers in four commercially available smartwatches, by assessing their frequency responses using two different calibration methods. Method 1, considered the reference method and involving individual sensor calibration, produced minimal deviations, validating the reliability of the devices within the tested ranges. In contrast, Method 2, intended for quicker calibration of multiple devices, showed greater deviations due to limitations in the calibration process.

The results revealed discrepancies in performance based on the calibration method used, highlighting the importance of selecting an appropriate technique to ensure more reliable and accurate measurements, especially for critical human movement monitoring applications.

Keywords: calibration, accelerometer, wearables, human movement monitoring.

1. Introducción

La tecnología *wearable* ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, impulsado por la integra-

ción de sensores avanzados en dispositivos portátiles como relojes inteligentes, gafas inteligentes o anillos biométricos. Estos sistemas se han adoptado ampliamente debido a su facilidad de uso, portabilidad y capacidad de recopilación de

datos en tiempo real. Sus principales aplicaciones incluyen la evaluación de riesgos laborales, el análisis del movimiento humano y la actividad física [1], con un potencial creciente en el ámbito de la salud [2]. Sin embargo, a pesar de sus capacidades, diversos estudios [3-5] han identificado limitaciones técnicas críticas en los sensores integrados de estos dispositivos, especialmente en lo relativo a la precisión y fiabilidad de la adquisición de datos.

Los relojes inteligentes se encuentran entre los dispositivos *wearables* más comunes [1] debido a la familiaridad del usuario con este tipo de herramientas y a su integración en la vida diaria. Estos dispositivos están equipados con sensores inerciales, incluidos acelerómetros y giroscopios triaxiales. El uso combinado de estos sensores permite un análisis detallado del comportamiento dinámico del usuario.

Es fundamental calibrar o verificar periódicamente los sensores, ya que factores como variaciones ambientales, deriva temporal o cambios en la configuración del aparato pueden afectar la fiabilidad de las mediciones. Para ello, se requiere un análisis exhaustivo del comportamiento dinámico del sensor, centrado en su respuesta en frecuencia y amplitud bajo condiciones de excitación vibratoria controlada [5]. Esta evaluación permite identificar los rangos en los que el sensor ofrece una precisión máxima, al mismo tiempo que evidencia posibles limitaciones en su capacidad de medición.

Este estudio comparativo se centra en la caracterización de los acelerómetros integrados en cuatro relojes inteligentes comerciales del mismo modelo. En estudios relacionados con la salud y la monitorización del movimiento humano, es habitual trabajar con múltiples dispositivos idénticos. Por ello, resulta imprescindible garantizar que todos presenten una respuesta similar y consistente, con el objetivo de poder realizar comparaciones fiables entre los datos registrados.

Es fundamental determinar los rangos relevantes de amplitud y frecuencia asociados con la dinámica del movimiento humano (mano-brazo) para ajustar el procedimiento de calibración a las condiciones específicas de funcionamiento del sensor inercial. En este contexto, los rangos de frecuencia se extienden hasta 10 Hz, correspondientes a los temblores fisiológicos [6], mientras que las amplitudes típicas alcanzan los 4 m/s^2 , como se observa durante la marcha humana [7]. Estos parámetros permiten evaluar la respuesta de los acelerómetros integrados en relojes inteligentes en aplicaciones del mundo real.

El presente estudio emplea dos enfoques diferentes para caracterizar los acelerómetros, con el fin de comparar y analizar las variaciones en el rendimiento de los sensores bajo diferentes procedimientos de calibración.

El primer método utiliza un banco de vibraciones uniaxial, que permite la caracterización individual de cada sensor mediante la aplicación de excitaciones vibratorias precisas a diferentes frecuencias y amplitudes. Aunque eficaz en términos de precisión, este método puede resultar lento al calibrar múltiples dispositivos de manera secuencial, lo que lo hace menos eficiente para aplicaciones a gran escala. Este método fue validado en [5] y, por tanto, se considera el enfoque de referencia para el análisis comparativo.

El segundo método emplea una plataforma vibratoria capaz de generar vibraciones sobre una superficie. A diferencia del enfoque anterior, éste permite la evaluación simultánea de múltiples sensores, reduciendo de manera significativa el tiempo de calibración.

El presente estudio se centra en la evaluación comparativa de las dos metodologías de calibración mencionadas previamente, empleadas para caracterizar la respuesta en frecuencia de acelerómetros integrados en relojes inteligentes [8]. A través de este análisis, se pretende identificar las ventajas y limitaciones de cada método en la evaluación del rendimiento de los sensores dentro de los rangos de frecuencia y amplitud asociados con el movimiento humano. El objetivo final es optimizar el procedimiento de calibración, mejorando la fiabilidad de las mediciones en aplicaciones biomecánicas.

2. Metodología de calibración

En estudios relacionados con la monitorización del movimiento humano, especialmente en el ámbito de la salud o en campos de seguridad como la evaluación de riesgos laborales, se utilizan típicamente múltiples dispositivos del mismo tipo y modelo. Por ello, es crucial que los datos registrados por estos sensores sean comparables, lo que implica que todos los sensores deben mostrar una respuesta precisa y consistente cuando se exponen a la misma señal de vibración mecánica.

De este modo, el presente estudio se centra en la caracterización de los acelerómetros integrados en cuatro relojes inteligentes comerciales del mismo modelo, mediante el análisis de su respuesta en frecuencia y amplitud. Los sensores se configuraron con una frecuencia de muestreo de 50 Hz y un rango máximo de amplitud de $\pm 2 \text{ g}$, valores considerados adecuados para registrar la dinámica típica del movimiento humano en escenarios del mundo real.

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de este estudio no es caracterizar completamente el acelerómetro, sino comparar dos metodologías de calibración y evaluar su eficacia, el análisis se limitó intencionadamente a examinar la respuesta en frecuencia del eje Z del sensor.



Figura 1. Orientación de los ejes en el dispositivo ensayado.

La orientación de los ejes en los dispositivos empleados se muestra en la Figura 1.

Una fuente de excitación vibratoria es un equipo diseñado específicamente para generar vibraciones controladas, ajustables tanto en frecuencia como en amplitud. Estas fuentes de excitación tienen como objetivo someter a los sensores a las condiciones de prueba definidas. La señal de entrada aplicada se trata de una onda sinusoidal, como se muestra en la Figura 2, cuyas características se definen de acuerdo con el plan de muestreo diseñado específicamente para cada estudio.

La calidad del proceso de calibración depende en gran medida del rendimiento de la fuente de excitación. Este estudio emplea dos metodologías, cada una con una fuente de excitación diferente: el Método 1, basado en un banco de vibración uniaxial, que permite la calibración individual de los acelerómetros mediante la aplicación de vibraciones precisas y controladas; y el Método 2, que utiliza una plataforma vibratoria capaz de someter múltiples sensores a oscilaciones uniformes de manera simultánea,

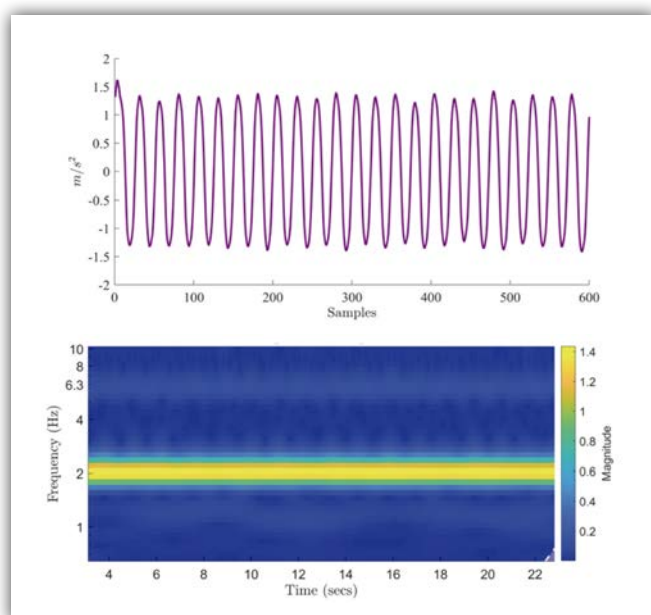


Figura 2. Señal capturada por el acelerómetro en una prueba de 2 Hz y 1 m/s². Arriba: señal en el dominio temporal; abajo: escalograma.

aplicando estas vibraciones en un ángulo de 45° respecto al plano horizontal.

La caracterización de los acelerómetros se realiza siguiendo la norma ISO 16063-21:2003 [9], que establece una metodología de comparación basada en el uso de un transductor de referencia. Este método consiste en acoplar de manera rígida un acelerómetro de referencia calibrado, asumiendo que funciona con un alto nivel de precisión, a la estructura del reloj inteligente, asegurando así que ambos sensores estén expuestos simultáneamente a la misma vibración mecánica controlada.

2.1. Plan de muestreo

Es fundamental establecer un protocolo de muestreo que defina claramente las frecuencias y amplitudes específicas que se van a analizar utilizar durante el proceso de calibración. Dicho protocolo debe garantizar que la caracterización de los sensores se realice bajo condiciones controladas que reproduzcan con precisión los escenarios típicos de vibración mano-brazo en situaciones reales de movimiento humano.

Respecto a las frecuencias analizadas durante la calibración, la norma ISO 16063-21:2003 [9] recomienda caracterizar los sensores empleando excitaciones vibratorias a frecuencias normalizadas de tercio de octava, definidas por la ISO 266:1997 [10]. En el caso del presente estudio, en el cual los acelerómetros ensayados están diseñados para el análisis del movimiento humano, es crucial adaptar los parámetros de excitación al rango de frecuencias típico de las actividades humanas, que se mantiene por debajo de 10 Hz [6, 11]. En consecuencia, este estudio seleccionó las frecuencias de 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 6,3 Hz, 8 Hz y 10 Hz para evaluar la respuesta en frecuencia de los sensores.

En cuanto a la amplitud, la calibración se realizó dentro de un rango de aceleración de 1 m/s² a 4 m/s², reflejando las magnitudes presentes en sistemas mano-brazo durante actividades comunes como caminar, correr o realizar tareas manuales [7].

Sin embargo, para desarrollar un plan de muestreo adecuado a cada método de calibración, es también fundamental determinar cuidadosamente el rango de operación de las fuentes de excitación utilizadas. En este contexto, se realizaron múltiples pruebas, estableciendo el intervalo operativo para cada método, como se muestra en la Figura 3.

El rango común compartido por ambos métodos de calibración alcanza los 4 m/s² dentro de la banda de frecuencias de 4 Hz a 6,3 Hz y disminuye a 1 m/s² en 2 Hz. El Método 1 ofrece la ventaja de permitir excitaciones a frecuencias más altas (por encima de 6,3 Hz), mientras que el Método 2 resulta especialmente adecuado para

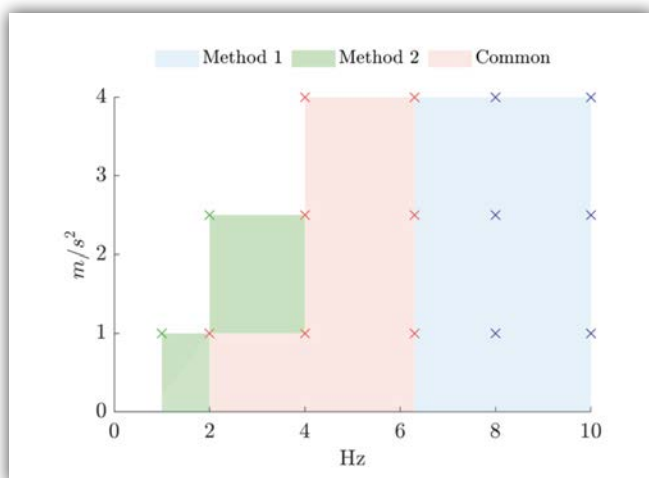


Figura 3. Rango de operación específico de las fuentes de excitación en el Método 1 y el Método 2, incluyendo el intervalo común.

excitaciones en rangos de baja frecuencia (por debajo de 4 Hz).

2.2. Montaje

El montaje para los ensayos de calibración presenta diferencias notables entre ambos métodos. En el Método 1, la fuente de excitación genera vibraciones en una configuración uniaxial y, debido a sus limitaciones geométricas y dimensionales, solo permite la colocación de un dispositivo a la vez, como se muestra en la Figura 4 (izquierda). Como consecuencia, el reloj inteligente se posiciona de manera que las vibraciones inducidas se apliquen exclusivamente a lo largo del eje Z de su acelerómetro. Además, el dispositivo se instala sobre un soporte rígido y correctamente fijado, evitando la introducción de vibraciones indeseadas y garantizando así la fiabilidad y repetibilidad requeridas para el proceso de calibración.

En el Método 2, la fuente de excitación vibratoria consiste en un actuador que induce vibraciones sobre una plataforma con un ángulo de 45° respecto al plano horizontal, como se ilustra en la Figura 4 (derecha). Debido a las dimensiones de la superficie donde se generan las vibraciones, es posible colocar múltiples dispositivos simultáneamente, lo que facilita un proceso de calibración más eficiente en comparación con el Método 1.

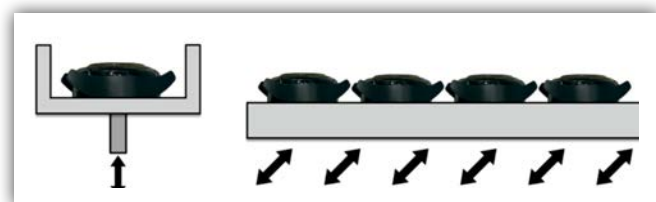


Figura 4. Movimiento inducido por las fuentes de excitación e instalación de los relojes inteligentes. Izquierda: Método 1; derecha: Método 2.

Teniendo en cuenta las características de la fuente de excitación en el Método 2, existen dos posibles configuraciones de montaje a la hora de colocar los relojes sobre la superficie vibratoria. La primera opción consiste en posicionar los dispositivos directamente sobre el plano horizontal de la plataforma, como se ilustra en la Figura 5 (izquierda). Sin embargo, bajo esta configuración, la excitación generada afectaría simultáneamente tanto al eje Z como al eje Y del acelerómetro del dispositivo, resultando en una excitación biaxial. Aunque la implementación mecánica de esta configuración es sencilla, no resulta adecuada para reproducir la excitación específica del eje Z realizada en el Método 1.

Además, para alcanzar los niveles de aceleración en el eje Z previamente definidos en el plan de muestreo, a , posicionar los dispositivos sobre el plano horizontal requeriría que la plataforma generase una excitación con una amplitud igual a $\sqrt{2}a$, superando así los niveles de aceleración previstos (Figura 5, izquierda). Este requisito podría dar lugar a un comportamiento no lineal de la fuente de excitación, especialmente a bajas frecuencias, donde se requieren mayores amplitudes. Como consecuencia, se podría comprometer la precisión de la calibración e incluso generar un riesgo de daño estructural en la plataforma debido a niveles de excitación excesivos.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la opción de montaje horizontal se consideró inadecuada para el proceso de calibración previsto. En su lugar, se propuso diseñar y fabricar un soporte personalizado que mantuviera los dispositivos con una inclinación de 45° , alineados con la dirección de excitación impuesta por el actuador, como se muestra en la Figura 5 (derecha). Este enfoque garantiza que el reloj inteligente experimente una excitación uniaxial a lo largo de su eje Z, replicando las condiciones del Método 1 y permitiendo así una comparación directa entre ambos métodos de calibración.

El diseño de un soporte personalizado para los dispositivos debe tratarse con especial cuidado, ya que existen diversos factores que pueden influir en la validez de los resultados. Entre ellos, se debe prestar atención al acoplamiento rígido del soporte a la plataforma vibratoria,

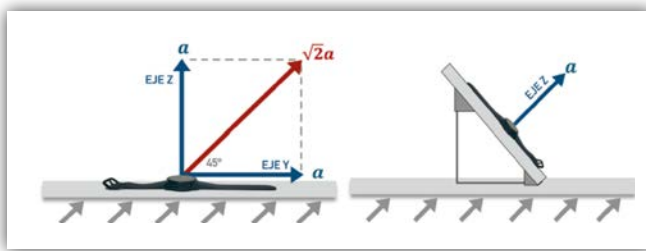


Figura 5. Configuración de los relojes inteligentes en el Método 2. Izquierda: plano horizontal, solución descartada; derecha: 45° , solución adoptada

así como a la correcta fijación de los dispositivos sobre el propio soporte fabricado. Cualquier holgura, desalineación o fuerza de sujeción insuficiente podría generar movimientos no deseados, provocando distorsión en las aceleraciones transmitidas y, en consecuencia, datos de calibración erróneos.

Además, es fundamental tener en cuenta que todas las estructuras mecánicas sometidas a excitaciones dinámicas experimentan inevitablemente algún grado de deformación. Si las frecuencias naturales del soporte se encuentran dentro o cerca del rango de frecuencias del estudio, podrían producirse resonancias no deseadas, amplificando potencialmente las vibraciones de entrada e introduciendo componentes de aceleración indeseadas en las señales medidas. Este fenómeno podría comprometer de manera significativa el proceso de calibración, conduciendo a estimaciones incorrectas y poco fiables de los niveles de aceleración en los sensores.

Por lo tanto, para mitigar este riesgo, es necesario garantizar que el soporte se comporte como un cuerpo rígido dentro del rango de frecuencias de trabajo. Para analizar estas consideraciones, se realizó un análisis modal del soporte fabricado. Los resultados revelaron que la primera frecuencia de resonancia se encuentra a 56 Hz (Figura 6), por encima del rango de frecuencias operativas de interés, dado que las pruebas de calibración no superan los 10 Hz. Como consecuencia, se puede afirmar que no existen resonancias significativas dentro del intervalo de trabajo que puedan comprometer la precisión de los resultados de calibración.

Independientemente del método de calibración empleado, y dado que se sigue una metodología comparativa, se instaló un acelerómetro de referencia sobre la estructura en la que se colocaron los dispositivos bajo evaluación. Esta disposición garantiza que tanto los relojes inteligentes como el sensor de referencia estén, en todo momento, expuestos a la misma señal de vibración mecánica.

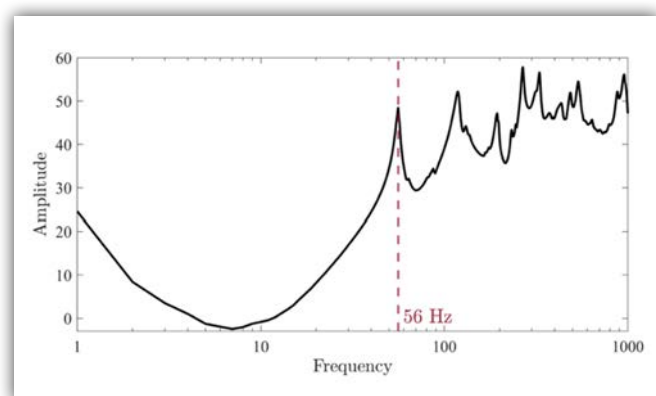


Figura 6. Respuesta en frecuencia global del soporte fabricado.

2.3. Procedimiento de calibración

De acuerdo con la norma ISO 8041:2007 [12] para la calibración de los sistemas de medición de vibraciones mano-brazo, cada prueba tuvo una duración de 30 segundos. Este período se extendió según fuera necesario para asegurar que la fuente de excitación alcanzara un estado de estabilidad. Para garantizar la validez y reproducibilidad de los resultados, se realizaron tres mediciones para cada combinación de frecuencia y amplitud evaluada. Siguiendo los planes de muestreo previamente definidos, el Método 1 implicó un total de 13 pruebas, mientras que el Método 2 consistió en solo 9 pruebas.

La señal de entrada se ajustó de acuerdo con el ensayo específico que se estaba realizando, modificando la frecuencia y la amplitud de excitación según fuera necesario para alinearse al plan de muestreo definido. Este ajuste aseguró que el acelerómetro de referencia registrara valores RMS de 1 m/s², 2,5 m/s² y 4 m/s², con las señales filtradas mediante un filtro *Butterworth* de segundo orden.

2.4. Procesado de datos

Una vez completadas las pruebas, los datos registrados por los sensores se procesaron utilizando un procedimiento idéntico para ambos métodos de calibración, asegurando así la comparabilidad de los resultados. Este paso consistió en filtrar los datos crudos del eje Z, lo cual es fundamental para aislar el rango de frecuencias de interés y eliminar cualquier ruido no deseado que pudiera distorsionar la señal de vibración. El filtrado se realizó empleando los mismos parámetros utilizados con el acelerómetro de referencia durante las pruebas; específicamente, un filtro paso banda *Butterworth* de segundo orden con un ancho de banda de tercio de octava, centrado en la banda de frecuencia relevante para cada prueba específica.

Además de eliminar el ruido procedente de la fuente y del entorno de medición, el filtrado también suprime el efecto de la gravedad. El acelerómetro mide la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el sensor, incluyendo tanto la aceleración debida al movimiento, como la debida a la gravedad (una señal de baja frecuencia, por debajo de 0,5 Hz, que es casi constante). Para centrarse específicamente en los datos inducidos por el movimiento, es imprescindible eliminar esta componente de baja frecuencia.

La Figura 7 muestra un ejemplo de la señal registrada por el acelerómetro de un reloj inteligente durante una prueba de 1 Hz y 1 m/s², tanto antes como después del proceso de filtrado.

Tras el proceso de filtrado, se calculó el valor RMS, que refleja la energía total de la señal de entrada durante un

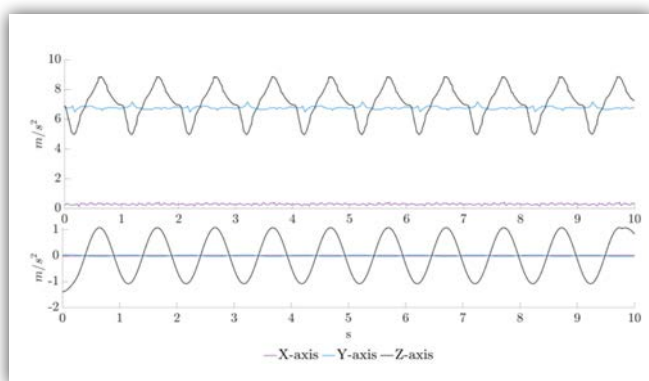


Figura 7. Señal capturada por el reloj inteligente en una prueba de 1 Hz y 1 m/s². Arriba: antes del filtrado; abajo: después del filtrado.

período definido. El parámetro principal evaluado durante la fase de procesado de datos es el error, que cuantifica la desviación entre las mediciones de los dispositivos de prueba y el acelerómetro de referencia.

3. Resultados

Se realizó un análisis comparativo para evaluar los resultados obtenidos con ambos métodos de calibración. Esta comparación consideró los valores RMS registrados por los relojes inteligentes y sus desviaciones respecto al acelerómetro de referencia, el cual, durante las pruebas realizadas, registró aceleraciones RMS filtradas de 1 m/s², 2,5 m/s² y 4 m/s².

La Figura 8 muestra la respuesta en frecuencia y amplitud de los relojes inteligentes utilizando el Método 1 de calibración. Los resultados indican que, en todas las pruebas realizadas, los valores registrados por los acelerómetros de los cuatro relojes son prácticamente idénticos. Esta consistencia demuestra que los dispo-

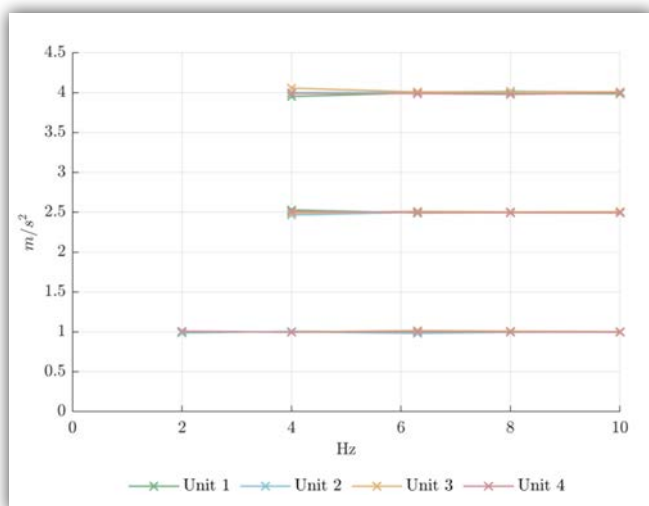


Figura 8. Valores RMS registrados por los relojes inteligentes con el Método 1.

sitivos responden de manera similar a las vibraciones aplicadas. Además, las mediciones obtenidas de los relojes inteligentes coinciden con los valores registrados por el acelerómetro de referencia, evidenciando un alto nivel de precisión.

La Figura 9 muestra la respuesta en frecuencia y amplitud obtenida con el Método 2. A diferencia del Método 1, estos resultados evidencian algunas diferencias entre los dispositivos ensayados. Las discrepancias más significativas entre los relojes en el Método 2 se observan cuando la amplitud de la señal de entrada es de 2,5 m/s², con desviaciones de hasta 0,14 m/s². En comparación, la desviación máxima registrada en todas las pruebas del Método 1 fue notablemente menor, 0,06 m/s². Esto demuestra que, a pesar de utilizar los mismos dispositivos, sus acelerómetros responden de manera diferente según la metodología de calibración aplicada. Estas diferencias sugieren que la fiabilidad de las mediciones depende no solo del hardware del reloj inteligente, sino también de la fuente de excitación empleada, lo que puede contribuir a una mayor variabilidad y comprometer la validez de los datos recogidos.

De acuerdo con la norma ISO 8041:2007 [12], un reloj inteligente puede utilizarse para monitorizar el movimiento humano y medir vibraciones mano-brazo únicamente si la desviación de su respuesta en frecuencia y amplitud se mantiene dentro de los límites definidos. Estos umbrales se establecen como límites porcentuales, lo que significa que a mayores amplitudes de entrada se permite un margen de error mayor. Los límites se fijan en 0,06 m/s² para una entrada de 1 m/s²; 0,15 m/s² para 2,5 m/s²; y 0,24 m/s² para una excitación de 4 m/s². Las Tablas 1 a 4 presentan las desviaciones absolutas de los relojes inteligentes con respecto al sensor de referencia. Las pruebas que exce-

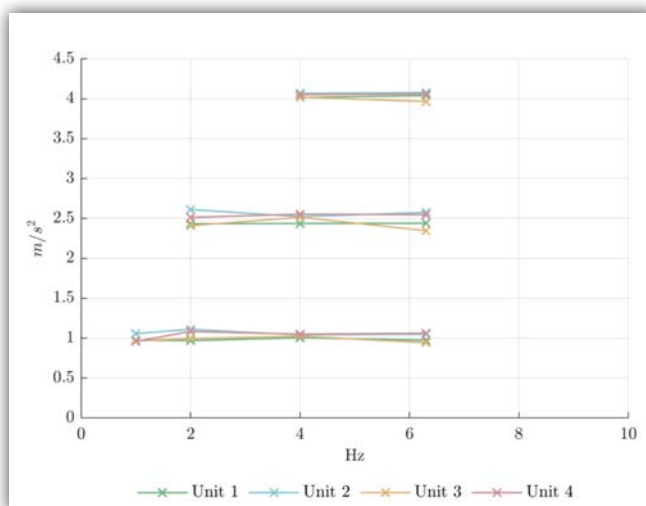


Figura 9. Valores RMS registrados por los relojes inteligentes con el Método 2.

Tabla 1. Desviaciones absolutas de la unidad 1 respecto al sensor de referencia

	1 m/s ²		2,5 m/s ²		4 m/s ²	
	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2
1 Hz		0,03				
2 Hz	0,01	0,03		0,07		
4 Hz	0,01	0,00	0,03	0,06	0,05	0,02
6,3 Hz	0,00	0,03	0,01	0,06	0,00	0,04
8 Hz	0,00		0,00		0,01	
10 Hz	0,00		0,00		0,01	

Tabla 2. Desviaciones absolutas de la unidad 2 respecto al sensor de referencia

	1 m/s ²		2,5 m/s ²		4 m/s ²	
	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2
1 Hz		0,06				
2 Hz	0,00	0,09		0,11		
4 Hz	0,00	0,04	0,03	0,02	0,00	0,07
6,3 Hz	0,02	0,05	0,00	0,08	0,00	0,08
8 Hz	0,00		0,00		0,02	
10 Hz	0,00		0,00		0,01	

Tabla 3. Desviaciones absolutas de la unidad 3 respecto al sensor de referencia

	1 m/s ²		2,5 m/s ²		4 m/s ²	
	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2
1 Hz		0,03				
2 Hz	0,01	0,00		0,09		
4 Hz	0,00	0,02	0,01	0,02	0,06	0,02
6,3 Hz	0,02	0,05	0,01	0,14	0,01	0,03
8 Hz	0,01		0,00		0,01	
10 Hz	0,00		0,01		0,01	

Tabla 4. Desviaciones absolutas de la unidad 4 respecto al sensor de referencia

	1 m/s ²		2,5 m/s ²		4 m/s ²	
	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2
1 Hz		0,04				
2 Hz	0,01	0,08		0,01		
4 Hz	0,00	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05
6,3 Hz	0,00	0,06	0,00	0,05	0,01	0,06
8 Hz	0,00		0,01		0,02	
10 Hz	0,00		0,01		0,00	

den los límites establecidos por la norma se destacan en rojo para mayor claridad.

En el Método 1, todos los relojes inteligentes cumplieron plenamente con las especificaciones requeridas, mostrando desviaciones considerablemente inferiores a los límites establecidos. Las discrepancias más destacables se produjeron con una excitación de entrada de 4 m/s^2 a 4 Hz , con desviaciones de $0,05 \text{ m/s}^2$ en la unidad 1 y $0,06 \text{ m/s}^2$ en la unidad 3. No obstante, estos valores se mantienen ampliamente dentro del límite de $0,24 \text{ m/s}^2$ y no representan ningún problema significativo.

En la mayoría de las pruebas realizadas, las desviaciones entre los relojes inteligentes y el sensor de referencia se mantuvieron por debajo de $0,01 \text{ m/s}^2$, lo que corresponde a un error inferior al 1 % para las tres amplitudes de entrada. Estos resultados demuestran claramente el alto nivel de consistencia y precisión alcanzado por el Método 1 de calibración en la medición de vibraciones mano-brazo.

En el Método 2, las desviaciones respecto al sensor de referencia se mantuvieron dentro del margen de error permisible en casi todos los casos, con solo dos excepciones. Para la excitación de 1 m/s^2 a 2 Hz , las unidades 2 y 4 mostraron errores de $0,09 \text{ m/s}^2$ y $0,08 \text{ m/s}^2$, respectivamente, superando ligeramente el límite de $0,06 \text{ m/s}^2$. Sin embargo, considerando que, utilizando este método, se realizaron un total de 36 pruebas y solo 2 superaron el límite establecido (representando menos del 6 % del total de pruebas), estas discrepancias pueden considerarse casos aislados. Por lo tanto, no comprometen la fiabilidad ni la eficacia general del método propuesto.

La comparación de las desviaciones entre métodos demuestra que, en la mayoría de los casos, el error es ligeramente mayor en el Método 2. Esto sugiere que, aunque el Método 2 proporciona resultados fiables, aún existe margen de mejora para alcanzar el nivel de precisión demostrado por el Método 1.

4. Discusión

Este estudio comparativo evalúa el rendimiento de los acelerómetros integrados en relojes inteligentes sometidos a dos procedimientos de calibración distintos. El análisis presentado a continuación revisa los principales resultados e identifica los factores que podrían haber contribuido a las variaciones observadas entre ambos métodos.

La respuesta en frecuencia y amplitud obtenida en los cuatro relojes inteligentes utilizando el Método 1 indica que las desviaciones son mínimas y pueden considerarse como despreciables. Esto sugiere que el comportamiento

de los dispositivos es altamente preciso y fiable dentro del rango de frecuencia y amplitud evaluado.

Es importante destacar que el Método 1 fue validado en [5], por lo que se utilizó como método de referencia para este estudio. En consecuencia, los resultados obtenidos mediante este enfoque se consideran fiables y precisos.

En comparación, las desviaciones obtenidas con el Método 2 son mayores que las del Método 1. Como se concluyó previamente, a partir del método de referencia validado, el rendimiento de los relojes inteligentes refleja de manera muy cercana el del acelerómetro de referencia. Por lo tanto, los errores observados en el Método 2 no se atribuyen al comportamiento de los relojes inteligentes en sí. Si no que estas discrepancias se consideran el resultado de errores inherentes al proceso de calibración de este método. Esto sugiere que es necesario mejorar el procedimiento de calibración del Método 2 para alcanzar una precisión comparable a la del Método 1.

Las diferencias observadas en el Método 2 pueden atribuirse en gran medida al procedimiento de montaje. A pesar de los esfuerzos por asegurar los dispositivos de la manera más firme y rígida posible, el método de fijación utilizado fue relativamente rudimentario. Este enfoque pudo haber provocado un acoplamiento imperfecto de algunos relojes inteligentes, ocasionando pequeños desplazamientos durante el proceso de medición. Estos movimientos no controlados podrían explicar las variaciones en el error observadas entre los diferentes relojes inteligentes.

Las limitaciones asociadas con el método de fijación manual sugieren que, en experimentos futuros, sería beneficioso contar con un sistema de montaje más preciso y automatizado, con el fin de minimizar estas fuentes de error y mejorar la fiabilidad de los resultados.

Además de las metodologías de calibración y los procedimientos de montaje, los factores ambientales también podrían haber contribuido a las variaciones observadas entre los dos métodos. Las fluctuaciones de temperatura y humedad relativa, así como las vibraciones en el entorno, pueden haber influido en las mediciones, especialmente en el Método 2, donde la fijación manual podría haber sido más susceptible a perturbaciones externas. Estudios futuros podrían abordar este aspecto realizando las pruebas en entornos más controlados, donde estos factores se monitoricen y regulen de manera continua.

5. Conclusiones

Los relojes inteligentes se utilizan cada vez más en aplicaciones como la atención sanitaria o la evaluación de

riesgos laborales, donde la precisión y la fiabilidad de los datos son fundamentales. En consecuencia, es esencial comprender en mayor profundidad el comportamiento de sus sensores inerciales para interpretar con exactitud los datos que generan. Con este propósito, el presente estudio presenta un análisis comparativo de dos métodos de calibración utilizados para caracterizar la respuesta en frecuencia y amplitud de los acelerómetros integrados en cuatro relojes inteligentes del mismo modelo.

El Método 1 utilizó un banco de vibración uniaxial, que permite la caracterización individual de los sensores, mientras que el Método 2 empleó una plataforma vibratoria que genera vibraciones sobre una superficie, permitiendo la evaluación simultánea de múltiples sensores. El Método 1, previamente validado, se estableció como referencia para evaluar el rendimiento de los acelerómetros. Dado que el objetivo es calibrar múltiples dispositivos en el menor tiempo posible, este estudio, junto con investigaciones futuras, se centran en perfeccionar el Método 2 basándose en la comparación con el Método 1.

En esta investigación, únicamente se analizó el eje Z del sensor. Sin embargo, una vez optimizado el método de calibración, el procedimiento debería ampliarse para evaluar los tres ejes del acelerómetro triaxial, con el fin de caracterizar completamente el dispositivo.

Dado que estos relojes se utilizan para recopilar datos relacionados con el movimiento humano, es fundamental caracterizar sus acelerómetros dentro de los rangos de amplitud y frecuencia típicos de estas actividades. Estos rangos incluyen amplitudes de hasta 4 m/s^2 y frecuencias de hasta 10 Hz. No obstante, cada método de calibración presenta limitaciones propias relacionadas con las fuentes de excitación. El Método 1 permite excitaciones de alta amplitud a frecuencias elevadas, pero resulta más limitado a bajas frecuencias. En contraste, el Método 2 puede generar amplitudes de excitación mayores a bajas frecuencias, pero es menos efectivo para alcanzar frecuencias más altas.

Los resultados del Método 1 mostraron que los relojes inteligentes presentan desviaciones mínimas respecto al sensor de referencia, lo que evidencia su comportamiento preciso bajo excitaciones vibratorias controladas. Esto sugiere que los acelerómetros de los relojes inteligentes pueden proporcionar mediciones fiables dentro de los rangos de frecuencia y amplitud probados, afirmando su potencial para el análisis de movimiento humano con alta precisión.

El Método 2 mostró desviaciones mayores respecto al método de referencia. Estas discrepancias no se atribuyen a problemas inherentes a los sensores de los relojes inteligentes, sino que se deben al procedimiento

de montaje. La fijación manual de los dispositivos pudo haber provocado movimientos no controlados durante las mediciones, lo que contribuyó a los errores observados.

Aunque estos desplazamientos no deseados no afectaron de manera significativa la precisión y fiabilidad general del método, destacan la necesidad de un sistema de montaje más robusto y automatizado para mejorar la consistencia de los resultados. En estudios futuros que empleen este método de calibración, se adoptará un procedimiento de montaje más controlado para minimizar las incertidumbres y garantizar mediciones más repetibles. Además, factores ambientales, como la temperatura y otras vibraciones, también pueden influir en el rendimiento de los sensores y deben considerarse cuidadosamente en futuras evaluaciones.

En resumen, la caracterización de los acelerómetros integrados en los relojes inteligentes es fundamental para su aplicación fiable en el análisis del movimiento humano y en campos relacionados. Este estudio evidencia la necesidad de seleccionar un método de calibración que optimice tanto la precisión de los resultados como la eficiencia en el procedimiento.

Investigaciones futuras se centrarán en perfeccionar el procedimiento de caracterización de los acelerómetros para minimizar las incertidumbres y, de este modo, mejorar la fiabilidad de las mediciones de los sensores inerciales.

Agradecimientos

Agradecimientos a la Sociedad Española de Acústica (SEA) por financiar este trabajo en reconocimiento a la obtención del mejor expediente académico en el Máster en Ingeniería Acústica de la Universidad Politécnica de Madrid durante el curso académico 2023/2024.

Los autores también agradecen al grupo de investigación *Ingeniería Sísmica: dinámica de suelos y estructuras* de la Universidad Politécnica de Madrid por permitir la realización de los experimentos en sus laboratorios.

Este estudio forma parte del proyecto de investigación BIOCLITE PID2021-123708OB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE.

Referencias

- [1] Y. Bello and E. Figetakis, *IoT-based Wearables: A comprehensive Survey*. 2023.
- [2] C. Polvorinos-Fernández *et al.*, «Evaluating Motor Symptoms in Parkinson's Disease Through Wearable Sensors: A Systematic Review of Digital Biomarkers», *Applied Sciences*, vol. 14, no. 22, doi: 10.3390/app142210189.

[3] D. Bravo and C. Rengifo, «Calibración de la Unidad de Medida Inercial de un Dispositivo Móvil,» *Revista Mexicana de Física E*, vol. 21, pp. 1-6, 07/01 2024, doi: 10.31349/RevMexFisE.21.020215.

[4] Y. Li, J. Georgy, X. Niu, Q. Li, and N. El-Sheimy, «Autonomous Calibration of MEMS Gyros in Consumer Portable Devices,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, pp. 1-1, 07/01 2015, doi: 10.1109/JSEN.2015.2410756.

[5] L. F. Sigcha, I. Pavón, P. Arezes, N. Costa, G. Arcas, and J. M. Lopez Navarro, «Occupational Risk Prevention through Smartwatches: Precision and Uncertainty Effects of the Built-In Accelerometer,» *Sensors*, vol. 18, 11/06 2018, doi: 10.3390/s18113805.

[6] J. A. B. Hernández, H. Alonso-Navarro, M. R. L. Piudo, and F. J. J. Jiménez, «Protocolo diagnóstico y terapéutico del temblor,» *Medicine - Programa de Formación Médica Continuada Acreditado*, vol. 11, no. 74, pp. 4483-4486, 2015/03/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.med.2015.02.016>.

[7] S. R. Hamner and S. L. Delp, «Muscle contributions to fore-aft and vertical body mass center accelerations over a range of running speeds,» *Journal of Biomechanics*, vol. 46, no. 4, pp. 780-787, 2013/02/22/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.11.024>.

[8] M. Centeno-Cerrato, «Metodología para caracterizar sensores inerciales orientado al análisis de movimiento humano utilizando diferentes bancos de ensayo,» Master's Degree in Acoustic Engineering (*Master's Thesis*), Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales & Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 2024.

[9] *ISO 16063-21:2003. Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers-Part 21: Vibration Calibration by Comparison to a Reference Transducer*, ISO: Geneva, Switzerland, 2003.

[10] *ISO 266:1997. Acoustics-Preferred Frequencies*, ISO:Geneva, Switzerland, 1997.

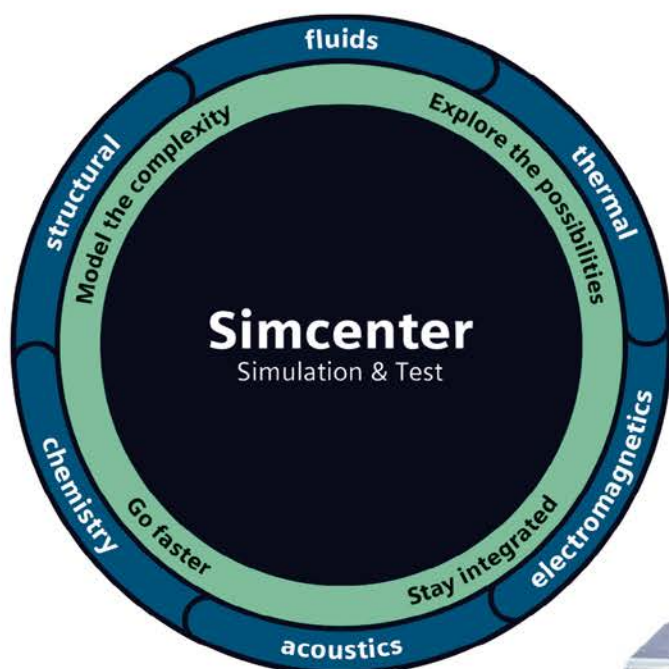
[11] D. Rincón et al., «Wristbands Containing Accelerometers for Objective Arm Swing Analysis in Patients with Parkinson's Disease,» *Sensors*, vol. 20, p. 4339, 08/04 2020, doi: 10.3390/s20154339.

[12] *ISO 8041:2007. Human Response to Vibration-Measuring Instrumentation*, ISO:Geneva, Switzerland, 2007.

Índice de anunciantes	
	Pág.
Track-Noise	2
Avantek	13
Saint-Gobain	20
Ingeniería Acústica García Calderón	26
Rockwool	35
dBelectronics	46
AAC - Centro de Acústica Aplicada	51
Sound of Numbers	56
SAES	63

Partner oficial de SIEMENS para la distribución del Portfolio Simcenter Testing Solutions:

Simcenter SCADAS HW & Simcenter Testlab SW



Mediciones a pie de campo siguiendo las directrices de la EASA sobre mediciones de ruido de vehículos aéreos no tripulados de menos de 600 kg

On-field measurements following the EASA guidelines on noise measurements of unmanned aircraft systems lighter than 600 kg



P. Miguel-Ayala^{1*}, L. Estévez-Mauriz², C. Romero-Romero³, A. J. Torija³

¹ Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial, Universidad de León, León, España

² Grupo de Investigación Ambiente Atmosférico (ATMOSENV), Área de Física Aplicada, Universidad de León, León, España

³ Acoustics Research Centre, University of Salford, Salford, Greater Manchester, UK

* Contacto: pmigua01@estudiantes.unileon.es

Resumen

Los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) han suscitado una atención creciente, lo que ha conducido al desarrollo de protocolos de medición de ruido, como las directrices publicadas en 2023 por la Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA). Estas directrices se centran en los procedimientos de medición de ruido para UAV (con un peso inferior a 600 kg), estableciendo los requisitos operativos y de medición. Uno de los requisitos clave es que la diferencia entre el nivel de presión sonora (SPL) del UAV y el nivel de ruido de fondo debe ser de, al menos, 15 dBA. Este estudio presenta los resultados de análisis acústicos realizados con tres UAV (de menos de 600 kg) a tres alturas distintas, siguiendo las directrices de la EASA. El emplazamiento del estudio fue seleccionado por contar con un nivel de ruido de fondo aproximado de 48 dBA. Los resultados mostraron que únicamente el UAV de mayor tamaño (7,3 kg) cumplió con la diferencia de 15 dBA en todas las alturas, mientras que el UAV más pequeño (0,25 kg) no alcanzó este umbral en ninguna de ellas. Dado que un bajo nivel de ruido de fondo (por debajo de 45 dBA) es fundamental para cumplir las directrices, el estudio concluye que resulta complejo aplicar estos estándares a UAV de pequeño tamaño. Asimismo, se plantea si las directrices de la EASA requieren de ser modificadas para adaptarse a los UAV de dimensiones reducidas.

Palabras clave: UAV, ruido, directrices.

Abstract

Unmanned Aircraft Systems (UAS) have gained increasing attention, leading to the development of noise measurement protocols, such as the 2023 guidelines from the European Union Aviation Safety Agency (EASA). These guidelines focus on noise measurement procedures for UAS (lighter than 600 kg), outlining measurements and operational requirements. A key requirement is that the difference between the UAS sound pressure level and the background sound level must be at least 15 dBA. This study presents acoustic analysis results from three UAS (weighing under 600 kg) at three different heights, following EASA's guidelines. The study site was chosen with a background noise level of around 48 dBA. Results showed that only the largest UAS (7,3 kg) met the 15 dBA difference at all heights, while the smallest UAS (0,25 kg) did not meet this threshold at any height. Given that low background noise (below 45 dBA) is crucial to fulfilling the guidelines, the study concludes that it is challenging to apply these standards to small UAS. The study discusses whether the EASA guidelines require amendment for small size UAS.

Keywords: UAS, noise, guidelines.

1. Introducción

El uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) ha crecido de forma exponencial en los últimos años, ampliándose a una gran gama de usos como la cartografía, la vigilancia, la entrega de paquetes y la inspección de infraestructuras. Sin embargo, esta rápida expansión plantea preocupaciones relacionadas

con el impacto ambiental y la contaminación acústica, especialmente en entornos urbanos. Cabe destacar que la concienciación sobre la calidad ambiental urbana es cada vez mayor. Un claro ejemplo de ello es el Pacto Verde Europeo [1] y los Objetivos de Desarrollo Sostenible [2], que actualmente lideran la visión de sostenibilidad en el entorno construido. Según el Pacto Verde Europeo [1], una de las principales preocupaciones es el impacto ne-

gativo del ruido, manifestado principalmente a través de las molestias provocadas por el ruido del tráfico rodado. Europa, al igual que otras partes del mundo, se enfrenta a un problema crónico en este sentido, con estimaciones que indican que el ruido relacionado con el tráfico (incluyendo tráfico por carretera, ferroviario y aéreo) en Europa Occidental provoca la pérdida de, al menos, un millón de años de vida saludable al año, siendo el tráfico rodado la fuente dominante [1].

Con el fin de regular estos aspectos, la Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA, de sus siglas en inglés) ha establecido directrices para la medición del ruido de drones [3], que incluyen requisitos específicos relativos al nivel de ruido de fondo para la realización de ensayos acústicos [3, p.12]. Sin embargo, estas normativas imponen restricciones que pueden resultar difíciles de cumplir para los UAV de pequeño tamaño. En particular, la exigencia de contar con niveles bajos de ruido de fondo (con diferencias superiores a 15 dBA) para obtener mediciones válidas puede dificultar la viabilidad de realizar pruebas en entornos reales, donde las condiciones acústicas rara vez son ideales.

Este artículo, basado en un estudio experimental de los niveles sonoros de UAV, examina la metodología y las posibles limitaciones de los criterios actuales de la EASA, destacando la necesidad de revisar ciertos parámetros para adaptar mejor la normativa a la realidad operativa de determinados UAV. Mediante la evaluación de diferentes modelos y condiciones de medición, este estudio busca proporcionar una base técnica que permita optimizar los procedimientos regulatorios y garantizar una evaluación más realista del impacto acústico de estas aeronaves.

2. Descripción del estudio experimental

El principal objetivo del estudio es realizar mediciones en diferentes modelos de UAV conforme a los criterios de la EASA y comparar los niveles de presión sonora de los tres UAV. Con ello, se busca analizar las diferencias de ruido en función del peso del UAV y proponer determinados ajustes.

El estudio experimental consistió en la medición de tres UAV diferentes, a tres alturas distintas. Se debió seleccionar un lugar y una fecha que cumplieran con requisitos específicos relativos a las características del pavimento, la velocidad del viento, la temperatura y la humedad para poder llevar a cabo las mediciones de acuerdo con la normativa. Además, las recomendaciones especifican el tipo de instrumentación que debe emplearse para las mediciones, cómo debe ser calibrada y la disposición del equipo. Por último, la directriz contempla dos casos

de estudio: vuelo a nivel (*level-flight*) y vuelo estacionario (*hover*). Cada uno de ellos debe cumplir con condiciones específicas respecto a las distancias y áreas de operación.

La información específica sobre cómo se llevó a cabo el estudio experimental se detalla en las secciones 2.1, 2.2, 3 y 4.

2.1 Vuelo

Lo primero que se debió seleccionar fue el tipo de vuelo que se iba a medir. Debido a su relevancia y cercanía con situaciones reales, se eligió un vuelo estacionario (*hover*).

Para un vuelo estacionario, las directrices establecen algunos requisitos particulares [3, pp. 11-16]. Para cumplirlos, los tres UAV fueron volados a tres alturas sobre el punto de medición: 12, 17 y 25 metros. La selección de estas altitudes responde a que 12 m es la altura mínima permitida para las mediciones; 25 m es la altura de referencia exigida por la normativa; y 17 m se eligió como una altura relevante para estudiar escenarios en los que los UAV vuelan a altitudes relativamente bajas, cerca de personas, con el fin de evaluar su impacto. Asimismo, se siguieron con precisión el resto de los requisitos, como la instrumentación empleada y su montaje, los límites de operabilidad y el número y duración de las mediciones.

2.2 Fecha y lugar

Para cumplir con estos requisitos, se eligió como ubicación una pista de tenis en el municipio de Ruiforco de Torío, en la provincia de León, España. Este lugar se seleccionó por varias razones, entre ellas que se encontraba fuera del espacio aéreo del aeropuerto de León. El pavimento de la pista de tenis era uno de los sugeridos en las directrices [3, p.10]. A su vez, este espacio está ubicado lejos de carreteras y zonas urbanas, lo que minimiza el ruido de fondo; no obstante, estaban presentes sonidos procedentes de la naturaleza (hojas moviéndose, un arroyo, etc.). Los días en que se llevó a cabo el estudio fueron el 29 de mayo de 2024 y el 11 de junio de 2024, ambos entre las 11:00 y las 13:30. Estas fechas cumplieron con las recomendaciones de las directrices respecto a la velocidad del viento, la temperatura y la humedad [3, pp. 8-9].

2.3 UAV

Para este estudio experimental, los UAV utilizados fueron proporcionados por el Servicio de Cartografía de la Universidad de León. Las características de cada UAV se presentan a continuación, ordenados de menor a mayor tamaño:

- **DJI Mavic 4:**
 - Masa: 249 g.
 - Autonomía máxima: 34 minutos.
 - Tamaño diagonal con hélices: ± 213 mm.
 - Velocidad horizontal máxima: 16 m/s.
- **DJI Phantom 4 Pro Plus:**
 - Masa: 1375 g.
 - Autonomía máxima: 30 minutos.
 - Tamaño diagonal con hélices: ± 490 mm.
 - Velocidad horizontal máxima: 20 m/s.
- **DJI Matrice 300 RTK (sensor LIDAR Zenmuse L1):**
 - Masa: 7270 g.
 - Autonomía máxima: 55 minutos.
 - Tamaño diagonal con hélices: ± 1150 mm.
 - Velocidad horizontal máxima: 23 m/s.

3. Instrumentación y software

Las directrices de la EASA también especifican la instrumentación necesaria para realizar las mediciones correctamente [3, pp. 27-28]. Los instrumentos utilizados en el estudio fueron:

- «Micrófono CCLD Free-field $\frac{1}{2}$ inch type 4966-h-041» de «Brüel & Kjær». No fue necesario calibrarlo, ya que era completamente nuevo. El micrófono cumplía con las directrices de la EASA. Según estas, el micrófono debía colocarse boca abajo, sobre una placa situada a 7 mm del suelo y debe estar protegido por una malla [3, p. 28].
- Sistema de medición acústica «SQadriga III» de «HEAD Acoustics». El único requerimiento de las directrices de la EASA es tener un sistema que pueda almacenar datos.

Para la extracción y el análisis de datos, se utilizó el software «ArtemiS SUITE» versión 15.7 de «HEAD Acoustics». Este software cumple con los requisitos normativos para la adquisición y el análisis de datos (como el análisis en *slow*, la capacidad de extraer L_{Aeq} y L_{Amax} , etc.)

4. Mediciones

4.1 Mediciones del ruido de los UAV

Como se indica en la subsección 2.1, los UAV debían volar dentro de ciertos límites de operabilidad y durante un tiempo determinado. Siguiendo las directrices de la EASA

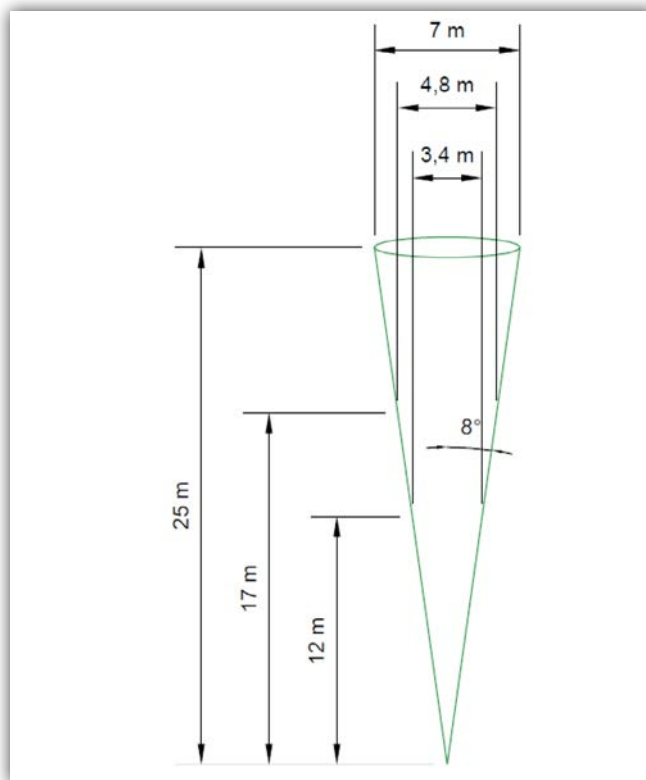


Figura 1. Límites de operabilidad para la medición de ruido de UAV. Adaptado de [3 p. 15].

[3, p.12], los UAV deben permanecer dentro de un cono de 8° desde la vertical sobre el punto de medición durante 30 segundos de grabación acústica. Se debe realizar un mínimo de seis pasadas y el L_{Aeq} debe calcularse a partir del nivel de presión sonora ponderado A promediado durante los 30 segundos.

Para cumplir con estas recomendaciones, el primer paso fue marcar el suelo con cinta adhesiva para indicar el radio del cono de acción que los UAV no debían superar en cada altura. Para las tres alturas elegidas, 12 m, 17 m y 25 m, los radios de acción correspondientes son 1,7 m, 2,4 m y 3,5 m, respectivamente. Los UAV fueron equipados con una cámara para trazar el radio de acción correcto. Las dimensiones del cono de acción se muestran en Figura 1.

4.2 Niveles de presión sonora del ruido de fondo

Para analizar el ruido de fondo, se realizaron mediciones en completo silencio, sin que ningún UAV estuviera operando, tanto antes como después de registrar los datos de cada UAV. El objetivo era verificar que el ruido de fondo se mantuviera estable durante todas las mediciones y, utilizando estos valores, evaluar si se cumple la diferencia de 15 dBA entre el nivel de ruido de fondo equivalente (ponderado A) y el nivel máximo de ruido (ponderado A) producido por el UAV.

Se eligieron como representativos del nivel de ruido de fondo el nivel de presión sonora medio (L_{Aeq}), el percentil 90 (L_{90}) y el nivel de presión sonora máximo (L_{Amax}). Para comparar los valores de ruido de los UAV con el nivel de presión sonora del fondo, el L_{Aeq} del ruido de fondo debe calcularse promediando los valores obtenidos antes y después de la medición.

5. Resultados

Las mediciones se procesaron utilizando el software «ArtemiS SUITE», versión 15.7 de «Head Acoustics», realizando un análisis siguiendo las recomendaciones. Según las directrices de la EASA, para un vuelo estacionario deben reportarse los siguientes datos [3, p. 40]:

- la fecha en la que se realizó la medición,
- la altitud de presión a la que se llevó a cabo la medición,
- el nivel de presión sonora equivalente, L_{Aeq} ,
- el nivel máximo de presión sonora, L_{Amax} ,
- el nivel de ruido de fondo, L_{Aeq} ,
- el percentil 90, L_{90} , es decir, el nivel de presión sonora por encima del cual se encuentra el porcentaje especificado de los datos, en este caso, el 90.

La Tabla 1 contiene el nivel de presión sonora del ruido de fondo para cada prueba de UAV. Se muestran los valores promedio de L_{Aeq} , L_{Amax} y L_{90} para cada prueba. El nivel máximo de presión sonora registrado fue de 50,4 dBA, mientras que los tres valores de L_{Aeq} se encuentran alrededor de 48 dBA.

5.1 Nivel de presión sonora de los UAV

De la misma manera que para el ruido de fondo, se recogieron los datos de nivel de presión sonora (SPL) de cada UAV a las tres alturas (12, 17 y 25 m). Las Figuras 2, 3 y 4 muestran los resultados de los tres UAV a 17 metros, ya que esta altura muestra mejor cuál de los UAV parecía más probable que cumpliera con el requisito de diferencia de 15 dBA respecto al ruido de fondo. No obstante, todos los valores recogidos se incluyen en la Tabla 2.

Tabla 1. Comparación del ruido de fondo L_{Aeq} , L_{Amax} y L_{90} para los tres UAV

	L_{Aeq}	L_{Amax}	L_{90}
DJI Mavic 4	48,2	49,6	47,7
DJI Phantom 4 Pro Plus	47,7	49,2	47,3
DJI Matrice 300 RTK	48,0	50,4	47,4

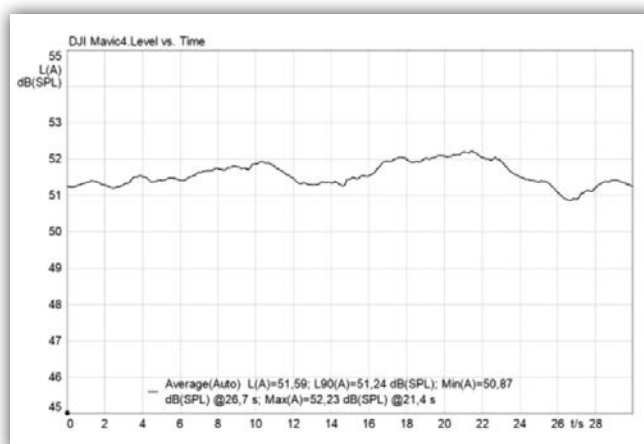


Figura 2. Mediciones del DJI Mavic 4 a 17 m. SPL vs. Tiempo.

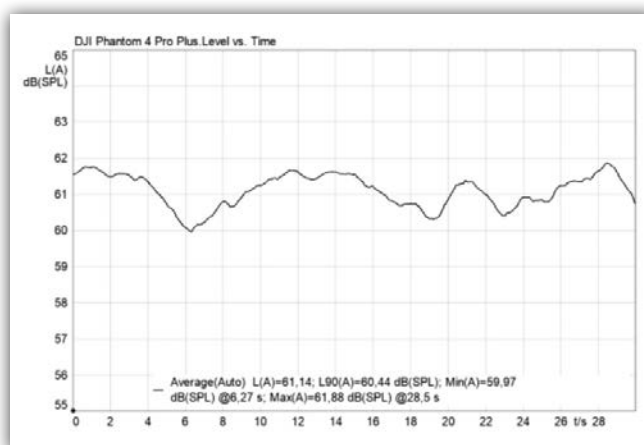


Figura 3. Mediciones del DJI Phantom 4 Pro Plus a 17 m. SPL vs. Tiempo.

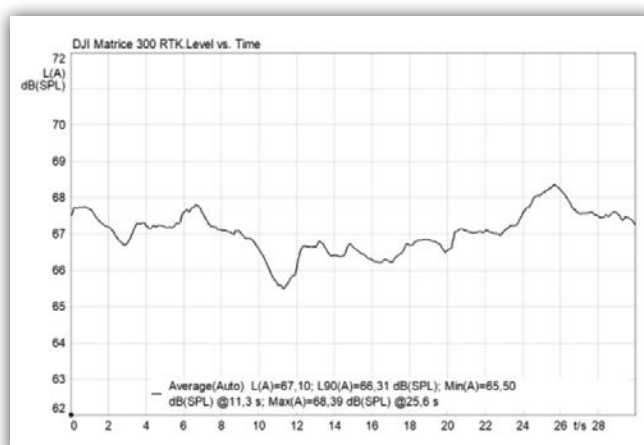


Figura 4. Mediciones del DJI Matrice 300 RTK a 17 m. SPL vs. Tiempo.

Para observar el contenido en frecuencia de los tres UAV, en la Figura 5 se muestra el espectro en bandas de octava (ponderado A) medido durante el procedimiento de vuelo estacionario a las alturas de 12 m (arriba), 17 m (medio) y 25 m (abajo).

Tabla 2. Valores de L_{Aeq} , L_{Amax} y L_{90} para los tres UAV

		12 m	17 m	25 m
DJI MAVIC 4	L_{Aeq}	52,5	51,6	49,5
	L_{Amax}	53,7	52,2	50,6
	L_{90}	52,4	51,2	49,0
DJI Phantom 4 Pro Plus	L_{Aeq}	62,9	61,1	56,8
	L_{Amax}	63,8	61,9	57,8
	L_{90}	62,3	60,4	56,3
DJI Matrice 300 RTK	L_{Aeq}	69,9	67,1	64,8
	L_{Amax}	71,0	68,4	65,8
	L_{90}	69,1	66,3	64,1

Dado que la normativa requiere el L_{Amax} , la Tabla 2 muestra los valores de L_{Aeq} , L_{Amax} y L_{90} para cada UAV a cada una de las tres alturas, presentando valores comprendidos entre 50,6 y 71,0 dBA (L_{Amax}).

Al comparar la Tabla 1 y la Tabla 2, se puede observar que la diferencia de 15 dBA respecto al ruido de fondo no se cumplió en todos los casos (ver Figura 6). El DJI Matrice 300 RTK, el mayor de los tres UAV, con un peso de 7270 g, es el único que cumple con el requisito de diferencia de 15 dBA en las tres alturas (las diferencias para cada altura son: 23 dBA, 20,4 dBA y 17,8 dBA, respectivamente). Por lo tanto, este estudio cumple con las recomendaciones. Por otro lado, el DJI Phantom 4 Pro Plus, el UAV de tamaño medio, con un peso de 1375 g, cumple con la diferencia de 15 dBA a 12 m, aunque por poco (16,1 dBA). A 17 m, no alcanza el requisito, aunque se encuentra muy cerca (14,2 dBA). Sin embargo, a 25 m se queda significativamente por debajo de la diferencia requerida (10,1 dBA). Finalmente, para el UAV más pequeño, el DJI Mavic 4, con un peso de solo 249 g, la diferencia de 15 dBA respecto al ruido

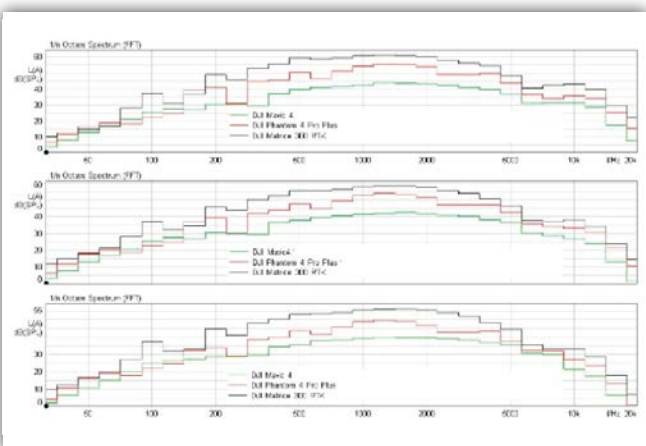


Figura 5. Espectro en bandas de octava (ponderado A) para los tres UAV a 12 m (arriba), 17 m (medio) y 25 m (abajo).

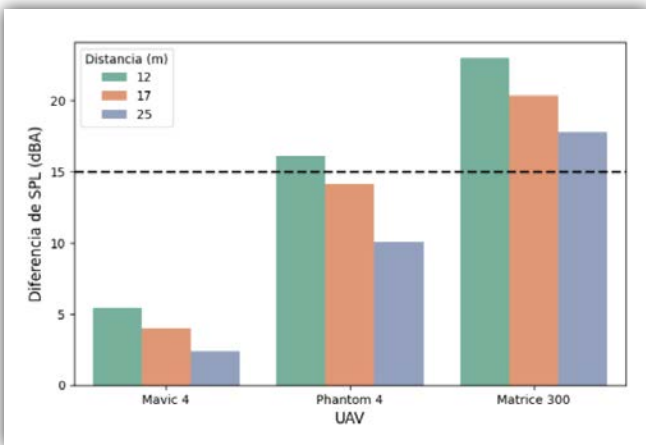


Figura 6. Diferencia entre el nivel máximo de ruido (L_{Amax}) del UAV y el nivel de ruido de fondo equivalente (L_{Aeq}). La diferencia de niveles debe ser mayor a 15 dBA para considerar la medición como válida.

de fondo no se cumple en ninguna de las tres alturas (5,5 dBA, 4 dBA y 2,4 dBA, respectivamente).

En la Figura 6 se muestra la diferencia entre el nivel máximo de ruido de los tres UAV y el nivel de ruido de fondo equivalente para las tres alturas.

6. Discusión

Como se indica en la sección 5.1, para los UAV con un peso inferior a 1,4 kg, resulta muy difícil superar la diferencia requerida de 15 dBA respecto al ruido de fondo, incluso cuando las mediciones se realizan en un lugar alejado de áreas urbanas.

Por estas razones, y basándose en este estudio, se sugiere que las recomendaciones de la EASA sean revisadas. Los cambios propuestos incluyen ajustar la diferencia entre el nivel máximo del UAV y el nivel de ruido de fondo, considerando el peso del UAV y la distancia de operación. Se sugiere que las directrices de la EASA estudien estas limitaciones para permitir que los UAV por debajo de la línea negra en la Figura 6, que no han superado la diferencia de 15 dBA respecto al ruido de fondo, puedan reducir el umbral. Para establecer limitaciones más precisas, deberían realizarse pruebas adicionales con UAV de distintos tamaños y a lo largo de un rango más amplio de altitudes y situaciones. No obstante, con los datos recopilados, se puede establecer una regresión lineal múltiple con las variables independientes masa (X_1) y altura (X_2), considerando como variable dependiente la diferencia entre el nivel de ruido de fondo y el nivel máximo de ruido del UAV (dBA):

$$y = 13,43747 + 0,001958X_1 - 0,364728X_2$$

De acuerdo con esto, cuando la masa aumenta, la diferencia en el nivel de ruido es mayor; y, cuando la altura aumenta, la diferencia en el nivel de ruido disminuye.

Tabla 3. Requisitos de masa y altura para cumplir con la diferencia de 15 dBA

Masa (g)	Altura (m)
≤ 3.100	12
3.650	15
4.000	17
5.500	25

Para cumplir con la diferencia requerida de 15 dBA, según la regresión realizada con los datos recopilados, se deben cumplir ciertos valores de masa y altura, que se muestran en la Tabla 3.

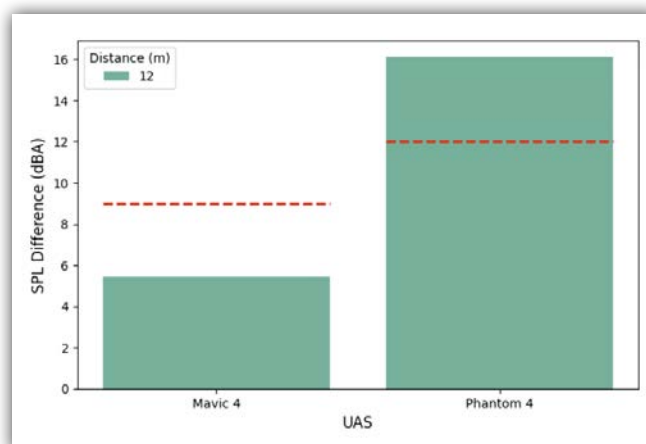
A partir de esta regresión, las masas inferiores a 3100 g requieren una menor diferencia de nivel de ruido a distintas alturas. En la Tabla 4 se presentan unos ejemplos de valores plausibles para vuelos a 12 m de altura. Lo mismo se podría realizar para otras alturas; sin embargo, la intención del presente trabajo es resaltar las variaciones y posibles adaptaciones.

La Figura 7 muestra las limitaciones para los UAV Mavic 4 y Phantom 4 Pro Plus según los valores de la Tabla 4. El UAV Matrice 300 RTK no está incluido, ya que su peso supera los 3100 g.

Como se ha destacado previamente, para establecer limitaciones más precisas se necesitan pruebas adicionales; no obstante, este trabajo establece una primera relación entre la masa del UAV, la altura de prueba y la diferencia de nivel requerida entre el nivel de ruido de fondo (L_{Aeq}) y el nivel máximo de ruido del UAV (L_{Amax}).

Tabla 4. Diferencia mínima de nivel para ciertas masas de UAV volando a 12 m de altura

Masa (g)	Diferencia de nivel (dBA)
250	9
250-750	10
750-1.250	11
1.250-1.750	12
1.750-2.300	13
2.300-2.800	14
2.800-3.100	14,5

**Figura 7.** Diferencia entre el nivel máximo de ruido (L_{Amax}) del UAV y el nivel de ruido de fondo equivalente (L_{Aeq}) para los UAV Mavic 4 y Phantom 4 Pro Plus a 12 m. La línea roja indica las limitaciones para cada UAV según Tabla 4.

Agradecimientos

Agradecemos al Servicio de Cartografía de la Universidad de León por su apoyo.

LLEM y PMA también desean agradecer el apoyo de la Universidad de León y de la Agencia Ejecutiva Europea de Educación y Cultura, Proyecto 101124439 — EURECA-PRO 2.0 — ERASMUS-EDU-2023-EUR-UNIV.

CRR y AJT también desean agradecer la financiación proporcionada por el programa Horizon Europe de la UE y por UK Research and Innovation (UKRI) bajo la garantía de financiación Horizon Europe del gobierno del Reino Unido (proyecto REFMAP, número de subvención 10061935; y proyecto ImAFUSA, número de subvención 101114776).

Referencias

- [1] European Commission, *Communication from The Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Pathway to a Healthy Planet for All EU Action Plan: «Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil»* COM/2021/400 final, 2021.
- [2] United Nations, *The Sustainable Development Goals Report 2024*, 2024.
- [3] European Union Aviation Safety Agency, *Guidelines on Noise measurement of Unmanned Aircraft Systems Lighter than 600 kg, Operating in the Specific Category (Low and Medium Risk)*, 2023.

Las soluciones acústicas completas que tus proyectos necesitan

- ENVOLVENTE
- ACRISTALAMIENTOS
- TABIQUERÍA
- TECHOS

Adaptados a las necesidades
de cada proyecto aportando el mayor
confort acústico y estético.

*Nos comprometemos a construir mejor
para las personas y el planeta*

Detección de sonido subacuático con un cable de fibra óptica suspendido verticalmente y sensores acústicos distribuidos

Underwater sound detection with a taut, vertically suspended fibre-optic cable and distributed acoustic sensing



Julián Peláez Quiñones^{1*}, Peter J. Thomas², Steinar Bjørnstad³, Per Lunde¹

¹ Departamento de física y tecnología, Universidad de Bergen, P.O. Box 7803, N-5020 Bergen, Noruega

² NORCE Centro de investigación noruego, P.O. Box 6031, 5892 Bergen, Noruega

³ Tampnet Noruega, Jåttåvågveien 7, 4020 Stavanger, Noruega

* Contacto: julian.pelaez@uib.no

Resumen

En este trabajo se estudia el uso de sensores acústicos/vibratorios distribuidos (DAS/DVS) para la detección de sonidos bajo el agua con cables de fibra óptica suspendidos verticalmente. Los sistemas DAS proporcionan mediciones dinámicas de la deformación relativa a lo largo de una fibra óptica, con una resolución de metros y con canales de muestreo espacial sobrepuestos y distribuidos a lo largo de cientos de kilómetros. En el sentido más estricto, los DAS son interrogadores ópticos que se conectan a un extremo de las fibras convencionales por fuera del agua y, en general, se sabe que tienen una sensibilidad menor que la mayoría de los hidrófonos. Los cables de fibra óptica son resistentes a condiciones extremas de temperatura y presión y, además, son relativamente baratos. El enfoque utilizado consiste en la generación activa de sonido en un fiordo con una fuente sumergida poco profunda y su detección con un cable tenso adyacente y un hidrófono calibrado y ubicado en el mismo sitio. Se presentan observaciones preliminares de la propagación vertical y la atenuación del sonido, así como estimaciones de los umbrales de detección del nivel de presión sonora (SPL) en el rango de 0,5-3,0 kHz. También se detecta una presencia generalizada de ondas atrapadas a lo largo del cable por debajo de aproximadamente 1 kHz. En comparación con las configuraciones rectilíneas, se observa que los cables bobinados pueden añadir ganancias efectivas de casi +20 dB a las señales hidroacústicas, lo cual reduce el umbral mínimo de presión acústica del DAS y amplía su rango de detección de fuentes activas y ruido ambiental.

Palabras clave: fibras ópticas, hidroacústica, sensores marinos, sensores distribuidos.

Abstract

The use of Distributed Acoustic/Vibration Sensing (DAS/DVS) for underwater sound detection with taut, vertical cables suspended in the water column is proposed. DAS is robust to extreme temperature/pressure conditions and inherently delivers concurrent, dynamic strain measurements at meter-resolutions with overlapping sensing elements over hundreds of meters. DAS also relies on dryroom interrogators and is generally known to have lower sensitivity than most hydrophones. Our approach consists of active sound generation in a fjord environment with a shallow, submerged source and detection with an adjacent, taut cable and a co-located, calibrated hydrophone. We present preliminary observations of the vertical propagation and attenuation of sound and estimates of Sound Pressure Level (SPL) detection thresholds in the 0.5-3.0 kHz range. We also observe a widespread occurrence of trapped waves along the cable below approx. 1 kHz. In comparison to rectilinear set-ups, we observe that cable coiling strategies can effectively add-up gains of nearly +20 dB to hydroacoustic signals, thus effectively decreasing the SPL detection threshold of DAS, extending its ambient noise detection range and reducing the minimum required source levels for active measurements.

Keywords: fibre optics, hydroacoustics, marine sensors, distributed sensors.

1. Introducción

La mayoría de las mediciones acústicas marinas se basan en nodos de hidrófonos autónomos dispuestos de forma dispersa, por ejemplo, en líneas de amarre o instala-

ciones en el fondo marino. Los arreglos de nodos a menudo pueden verse limitados por el alto consumo de batería a bajas temperaturas, las profundidades máximas nominales de los instrumentos, los requisitos de mantenimiento, el almacenamiento limitado de datos o la complejidad de la

transmisión inalámbrica de datos. Estos inconvenientes se pueden evitar si se utilizan sensores acústicos/vibratorios distribuidos (DAS/DVS) [1,2], una técnica que convierte un cable de fibra óptica (FO) en un arreglo denso y curvilíneo de sensores de deformación dinámica. Los sistemas DAS/DVS pertenecen a un grupo más amplio de tecnologías fotónicas conocidas como sensores de fibra óptica (FOS). Estas aprovechan la respuesta variable de la luz guiada a lo largo de una fibra óptica convencional (utilizada principalmente para telecomunicaciones) cuando se ve afectada por estímulos externos, como deformaciones o cambios de temperatura. Los DAS/DVS son, entre otros, especialmente sensibles a la deformación mecánica causada por impactos, a variaciones de presión en el medio circundante y a ondas sismoacústicas incidentes en el cable que contiene la fibra. Estas técnicas han ganado notoriedad en las últimas décadas debido a la existencia de redes masivas de cables de fibra óptica en tierra y mar, así como por su potencial en una amplia variedad de aplicaciones, que incluyen el monitoreo ambiental, la prospección de recursos energéticos y la vigilancia [3].

Mientras que la gran mayoría de estudios sobre FOS submarinos utilizan cables cuasi-horizontales acoplados al lecho marino (por ejemplo, enterrados un par de metros bajo los sedimentos), en este artículo se explora la capacidad de detección de sonido bajo el agua de un cable de FO tenso y suspendido verticalmente en la columna de agua, sin acople directo con un medio sólido. En concreto, en este trabajo se describen las señales detectadas y se estima un umbral SPL mínimo para dicha configuración.

2. Experimento

El cable utilizado es un cable FO convencional mono-modal (*single-mode*) OFS 004f de 50 m de longitud, sim-

plex, con fibras sueltas incrustadas en un tubo protector de plástico relleno de gel y protegido por una funda de goma, con un diámetro exterior de 8 mm. Este cable se suspende verticalmente desde una plataforma acuática flotante hasta casi el fondo de un fiordo protegido (Figura 1b). Las dos fibras que discurren en paralelo dentro del cable están empalmadas en bucle de retorno en su extremo sumergido, de modo que ambas son interrogadas en serie con una sola medición. Una cuerda con pesos sujeta al extremo sumergido del cable se utiliza para mantenerlo tenso y en una posición fija, evitando así oscilaciones extremas e indeseadas del cable que, si son lo suficientemente fuertes, pueden saturar la señal DAS. Esto implica que las ondas acústicas se acoplan directamente desde el agua al cable, y que no están en contacto con un medio sólido (por ejemplo, sedimentos o el lecho marino), como ocurre en la gran mayoría de los estudios que utilizan DAS/DVS [3].

El interrogador DAS se basa en un esquema $\Delta\phi$ -OTDR (reflectometría óptica de variación de fase en el dominio del tiempo) con un interferómetro Mach-Zehnder desbalanceado (IMZI) 3×3 [4]. Se utiliza un algoritmo de diferenciación y multiplicación cruzada para recuperar las variaciones de fase óptica. Esta salida es proporcional a la deformación axial de la fibra. La distancia de galga o medición (*gauge length*), que viene determinada por la longitud física de un componente de fibra dentro del instrumento, se fijó en 5 m; la longitud del pulso, en 4 m; y la frecuencia de repetición de los pulsos (muestreo), en 20 kHz. Dada la naturaleza de la medición del DAS, solo es necesario conectar el dispositivo interrogador a uno de los extremos de la fibra, ya que se miden las variaciones temporales de fase de la componente reflejada (*backscatter*) de los pulsos ópticos transmitidos. Estas variaciones de fase son linealmente proporcionales a la deformación (*strain*) axial en la fibra en un rango relativamente amplio.

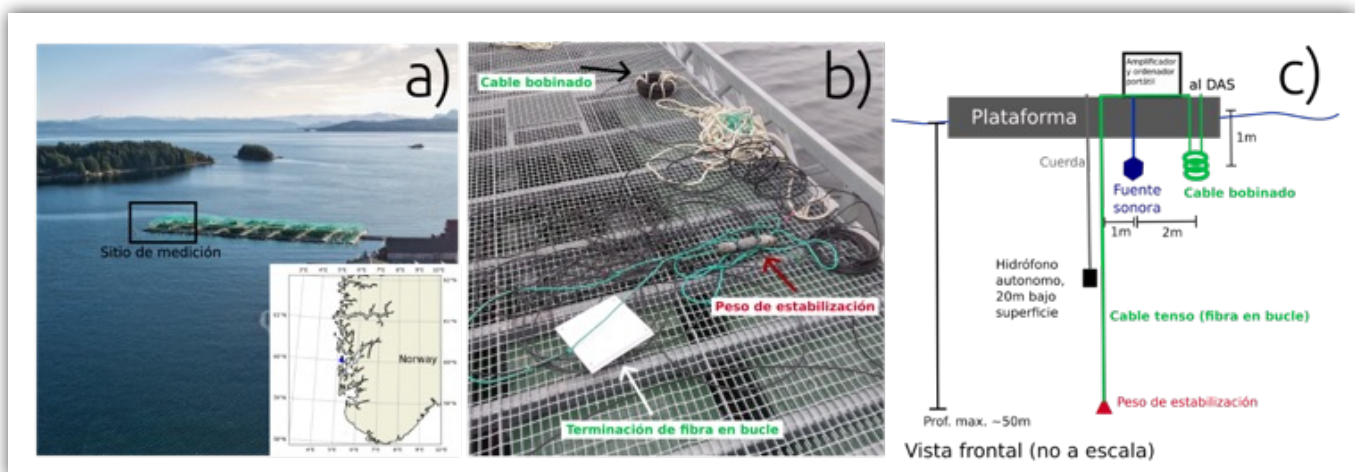


Figura 1. a) Lugar del experimento, un fiordo en la isla de Austevoll, Noruega occidental (<https://www.hi.no>). b) Cable (color negro) utilizado en el experimento. Las placas blancas se utilizaron para proteger la terminación en bucle de las fibras. Se utilizaron cuerdas para fijar los pesos de estabilización y el cable bobinado. c) Esquema de la geometría del experimento.

Un altavoz subacuático Lubell LL916, que es casi omnidireccional en el margen frecuencial de 1-2 kHz, se sumerge un metro por debajo de la superficie del mar, a un metro lateralmente del eje del cable. Para estimar el umbral de detección de presión acústica a lo largo del cable, se transmiten señales de barrido espectral (*chirps*) lineales de 1 kHz de ancho de banda, con una duración de 500 ms y una frecuencia central que aumenta en pasos de 1 kHz. Un hidrófono MTE μ Aural calibrado se encuentra a pocos centímetros del cable y a 20 m de profundidad. A modo de comparación, se enrolló circularmente un segmento adicional del mismo cable en forma de bobina (80 m, con un diámetro medio de 40 cm), el cual se fijó y se sumergió a 1 m de profundidad, como se muestra en las Figuras 1b y 1c. Durante el experimento, el clima fue tranquilo: sin lluvia, con brisa ligera y superficie del mar en calma.

3. Resultados

La Figura 2 muestra los espectrogramas de densidad de potencia espectral (PSD) de las señales de barrido espectral transmitidas y las respectivas grabaciones del hidrófono y del DAS en los segmentos tensados y enrollados del cable. El ruido ambiental se mantuvo cercano a los 100 dB ref 1 μ Pa. Se puede observar que el hidrófono

detecta señales de ruido de fondo procedentes de fuentes no relacionadas que no están presentes en la fibra (por ejemplo, a los 38 s). El cable tensado consigue detectar sonidos de hasta casi 3 kHz con una relación señal-ruido (SNR) máxima de 17 dB en las bandas de 1 y 2 kHz. Sorprendentemente, con el cable de fibra enrollado, se detectan las mismas señales en las mismas bandas con 37 dB de SNR, a pesar de que su separación de la fuente es prácticamente la misma que la del segmento del cable tensado. Sin embargo, cabe señalar que este último segmento se ve afectado por la bien conocida insensibilidad lateral del DAS a los rayos que llegan en ángulos pronunciados, casi perpendiculares con respecto al cable [2]. Las frecuencias más altas (incluidos los armónicos de orden superior) son recuperadas por la bobina hasta 10 kHz, con una SNR media de 18 dB a 5 kHz.

Suponiendo una propagación esférica y sin tener en cuenta la absorción acústica, ya que las distancias entre los equipos son cortas, el nivel sonoro de la fuente activa (SL) se puede estimar, en primer lugar, a partir del SPL_r medido por el hidrófono utilizando el siguiente modelo:

$$SL = SPL_r + 20 \log_{10}(r_{sr}) \quad (1)$$

donde r_{sr} es la distancia entre la fuente y el hidrófono. El mismo modelo de pérdida de transmisión permite estimar

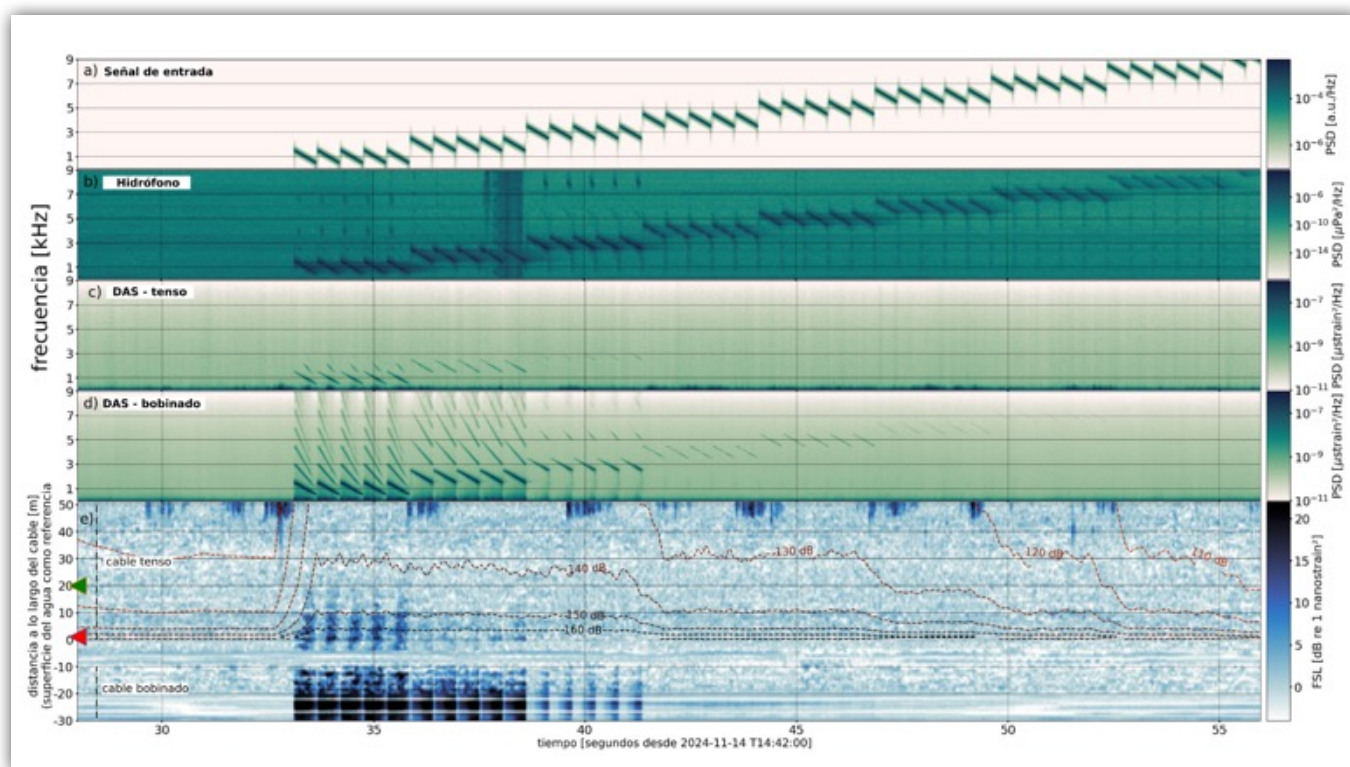


Figura 2. Densidad de potencia espectral de a) señal de entrada, b) grabación del hidrófono, c) cable tensado (promediada en profundidad sobre los primeros 10 m bajo superficie) y d) mediciones de 60 m de cable bobinado. e) Nivel de deformación de fibra del cable tenso y un segmento de bobina entre 0,5 y 9,0 kHz. Los contornos representan el SPL modelado desde la fuente sonora (en dB ref 1 μ Pa) suponiendo atenuación puramente por divergencia esférica. Los marcadores rojos y verdes señalan los canales DAS más cercanos a la fuente y al hidrófono, respectivamente.

SPL(r) como función de la separación entre la fuente y el canal DAS bajo análisis, r , utilizando el SL estimado empíricamente. El umbral de detección del SPL se sitúa cerca de los 140 dB para esta configuración de cable DAS (Figura 2e). Esto corresponde aproximadamente a un nivel de deformación axial en la fibra (FSL) de 0 dB ref 1 nanodeformación relativa ($\text{nanostain} = 1 \times 10^{-9}$), definiéndose el FSL como:

$$\text{FSL} = 10 \log_{10}(s_{\text{rms}}^2/s_0^2) \quad (2)$$

donde s_{rms} corresponde al valor RMS de la señal de deformación de la fibra y s_0 es una deformación de referencia, considerando aquí 1 nanodeformación, que es una sensibilidad típica de los sistemas DAS comerciales. Dado que la fuente está casi alineada con el eje del cable, se espera que este umbral de detección esté directamente relacionado con el límite de sensibilidad del sistema DAS-cable. Por el contrario, las frecuencias más altas pueden verse afectadas de forma diferencial por los patrones de radiación directivos y asimétricos de la fuente.

Aunque el cable se mantuvo tenso, las señales provenientes de su extremo inferior indican un ruido esporádico de baja frecuencia, dominante por debajo de aproximadamente 500 Hz. Las Figuras 2e y 3 confirman que este ruido corresponde a ondas atrapadas generadas en el extremo sumergido del cable y que rebotan a lo largo de su estructura, viajando con velocidades de fase cercanas a los 2 km/s y probablemente inducidas por corrientes marinas cercanas al fondo que jalen el extremo del cable cargado con masas colgantes. Cabe señalar que la aparición de estas señales ruidosas no es sincrónica con el sonido transmitido y su distribución en los datos es cuasi-aleatoria.

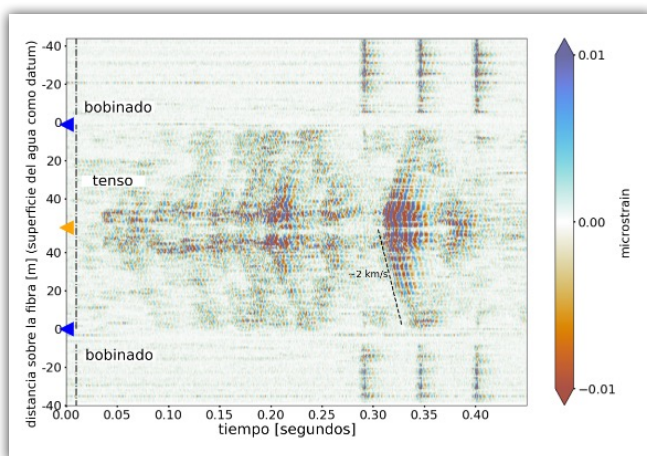


Figura 3. Ondas atrapadas irradiando desde el extremo profundo (marcador naranja) del cable tenso (filtrado en el rango 0,1-1,0 kHz). Los marcadores azules indican los extremos cercanos a la superficie del cable. La simetría horizontal se debe a la terminación en bucle de la fibra.

4. Discusión

Los resultados preliminares sugieren un límite superior de frecuencia de detección del sonido cercano a los 3 kHz para el cable tensado con nuestra configuración DAS, teniendo en cuenta el nivel de fuente máximo implementado, que era cercano a los 170 dB ref 1 μPa . La conocida insensibilidad lateral de la fibra puede explicar la falta de señales de ruido ambiental detectadas por los DAS, que sí están presentes en el hidrófono. En conjunto, estos factores limitan la capacidad de los cables de fibra convencionales para monitorizar el ruido ambiental. Además, los sonidos por debajo de 500 Hz pueden superponerse en frecuencia con la onda atrapada que se propaga a lo largo del cable. Sin embargo, el uso de masas correctamente fijadas al extremo del cable colgante redujo en gran medida este efecto de «azote» del cable.

Los segmentos bobinados del cable ampliaron eficazmente el rango de sensibilidad hasta al menos 10 kHz debido al confinamiento de las distancias de galga sobre la fibra en volúmenes más pequeños dentro del campo de presión acústica. También mejoró la respuesta direccional, aumentó la SNR gracias al apilamiento de múltiples canales y se espera que permita la detección de sonido hasta 20 dB por debajo del umbral del cable tensado. Este enfoque es similar al utilizado por los hidrófonos FO [5], en los que fibra descubierta (*bare fibre*) se enrolla alrededor de un mandril y se utiliza como sensor puntual. En este caso, sin embargo, se utilizó un cable y ningún mandril. Las instalaciones de cables FOS para la detección de ruido ambiental podrían basarse en una serie de bobinas situadas en posiciones estratégicas con el fin de aumentar la relación señal-ruido y utilizarse como plantillas de filtrado adaptado (*matched filtering templates*) para la detección de señales más débiles en el cable tensado. Un estudio reciente ha demostrado cómo un cable especialmente diseñado y enrollado helicoidalmente puede utilizarse como *streamer* de prospección sísmica mientras se remolca desde un barco [6]. En términos más generales, los enfoques de procesamiento de correlación cruzada y apilamiento (por ejemplo, la formación de haces - *beamforming*) también son herramientas conocidas para mejorar la SNR de las mediciones con arreglos de sensores, como aquellas proporcionadas por los DAS/DVS.

Se cree que el umbral de detección del cable tensado, de alrededor de 140 dB ref 1 μPa para la SNR más alta obtenida (a 1 kHz), está muy influenciado por el ruido óptico del sistema interrogador implementado. Sin embargo, la capacidad de detección de longitudes de onda más cortas podría mejorarse con distancias de galga más cortas, con lo que se lograrían resoluciones

más altas a costa de relaciones señal-ruído más bajas. Además, los FOS son un campo en rápido desarrollo y continuamente surgen mejoras en el rendimiento del proceso de interrogación óptica que podrían mejorar la capacidad de detección [3].

5. Conclusiones

En este artículo se han presentado resultados preliminares de la detección de sonido subacuático con un cable de fibra óptica suspendido y sensores DAS/DVS. Los resultados destacan la capacidad de un cable de fibra óptica convencional para detectar ondas hidroacústicas cuando está tenso y suspendido verticalmente en el agua, así como enrollado o bobinado. Esta última configuración tiene una capacidad de detección notablemente mayor en comparación con la primera. Como era de esperar, dada la insensibilidad lateral de las fibras rectilíneas, las ondas sonoras detectadas en el cable tensado son aquellas que se propagan de forma cuasi vertical, es decir, casi paralelas al eje de la fibra, mientras que otras que llegan en ángulos de incidencia elevados (por ejemplo, ondas sonoras guiadas en el mar provenientes de fuentes distantes) apenas se logran detectar o pasan desapercibidas. En comparación con la mayoría de los hidrófonos, los datos sugieren una sensibilidad sonora relativamente baja para un cable de fibra óptica convencional tensado bajo el agua, con umbrales de detección mínimos de aproximadamente 140 dB ref 1 μ Pa. Sin embargo, se subraya la posibilidad de mejorar la capacidad de detección de estos sistemas.

Agradecimientos

Espen Storheim, Thor Husøy, Jostein Hovdenes, Anders Vahlin, Frank Ådland, Jean-Baptiste Danré, Yi-Chun Chen y Kjetil Stensland por apoyo técnico y la provisión de materiales o dispositivos. Apoyo financiero del Consejo de Investigación Noruego, proyecto 309612, SFI Smart Ocean.

Referencias

- [1] R. Posey, G. Johnson, and S. Vohra, «Strain sensing based on coherent Rayleigh scattering in an optical fibre,» *Electronics Lett.*, vol. 36, pp. 1688-1689, 2000.
- [2] A. Hartog, *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. Boca Raton, FL, US: CRC Press, 2017.
- [3] Y. Shang, M. Sun, C. Wang, J. Yang, Y. Du, J. Yi, W. Zhao, Y. Wang, Y. Zhao, and J. Ni, «Research Progress in Distributed Acoustic Sensing Techniques,» *Sensors*, vol. 22, p. 6060, 2022.
- [4] X. Lu and P. J. Thomas, «Phase Error Evaluation via Differentiation and Cross-Multiplication Demodulation in Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry,» *Photonics*, vol. 10, no. 5, 2023.
- [5] J. A. Bucaro, H. D. Dardy, and E. F. Carome, «Optical fiber acoustic sensor,» *Appl. Opt.*, vol. 16, no. 7, pp. 1761-1762, 1977.
- [6] J. Chen, H. Li, X. Xiao, Z. Zeng, K. Xiao, P. Wen, Z. Yan, and Q. Sun, «Fully distributed fiber-optic streamer with small channel spacing for marine seismic acquisition,» *Ocean Engineering*, vol. 294, p. 116852, 2024.

Ingeniería Acústica García-Calderón

Proveedores de equipamiento para medidas de ruido y vibraciones

Diseño y suministro de cámaras anecoicas

CÁMARAS ACÚSTICAS



FUENTES SONORAS ULTRALIGERAS



MÁQUINAS DE IMPACTO



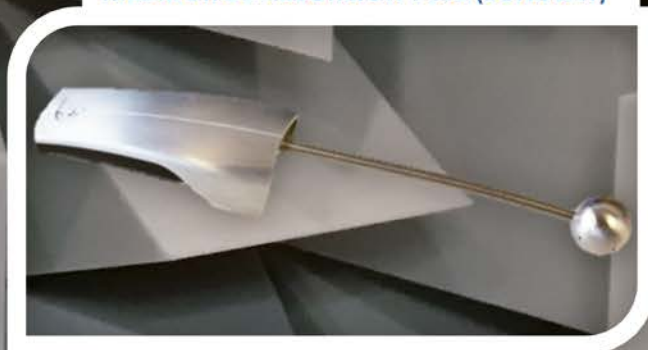
ANALIZADORES MULTICANAL Y SONOMETROS



SONDAS INTENSIDAD 3D, PU



MEDIDOR DE ABSORCION Y STL (SONOCAT)



IAG
Ingeniería Acústica García-Calderón



Ingeniería Acústica García-Calderón



C/ Soto Hidalgo 24, local 8

28042 Madrid, Spain



Telf.: +34 91 128 89 47



info@garcia-calderon.com



<https://garcia-calderon.com/>



Beamforming invariante en frecuencia en elevación y acimut utilizando Autograd y arreglos concéntricos circulares de micrófonos

Elevation and azimuth frequency invariant beamforming using Autograd and concentric circular microphone arrays



Jorge Ortigoso-Narro^{1,2*}, José A. Belloch¹, Máximo Morales-Cespedes², Máximo Cobos³

¹ Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid

² Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Carlos III de Madrid

³ Departamento de Informática, Universidad de Valencia

* Contacto: jortigos@pa.uc3m.es

Resumen

El uso de *arrays* de micrófonos planos y circulares concéntricos en *beamforming* se ha popularizado debido a su capacidad para optimizar tanto los ángulos de acimut como de elevación, lo que los hace ideales para tareas de audio espacial como la localización de fuentes sonoras y la supresión de ruido. A diferencia de los arreglos lineales, que restringen el direccionamiento a un único eje, los arreglos 2D permiten la optimización en dos ejes, aunque el control de la elevación sigue siendo un desafío. Este estudio explora la integración de Autograd, una herramienta de diferenciación automática, con arreglos circulares concéntricos para imponer restricciones de ancho de haz e invariancia en frecuencia. Esto permite una optimización continua en ambos ángulos, manteniendo el rendimiento a lo largo de un amplio rango de frecuencias. Evaluamos nuestro método mediante simulaciones de ancho de haz, ganancia de ruido blanco y directividad en múltiples frecuencias. Presentamos un análisis comparativo frente a otras estrategias, incluyendo *delay-and-sum*, *delay-and-sum* modificado, un método basado en la expansión de Jacobi-Anger y un enfoque de descenso por gradiente con ventana gaussiana. El método propuesto logra una mayor selectividad espacial y lóbulos principales más estrechos, particularmente en el eje de elevación a frecuencias bajas. Estos resultados subrayan la efectividad de nuestro enfoque para mejorar el desempeño del *beamforming* en aplicaciones de sensorización acústica y audio espacial que requieren control preciso en dos ejes.

Palabras clave: *beamforming*, autograd, arrays circulares concéntricos, invariancia frecuencial.

Abstract

The use of planar and concentric circular microphone arrays in beamforming has gained attention due to their ability to optimize both azimuth and elevation angles, making them ideal for spatial audio tasks like sound source localization and noise suppression. Unlike linear arrays, which restrict steering to a single axis, 2D arrays offer dual-axis optimization, although elevation control remains challenging. This study explores the integration of autograd, an automatic differentiation tool, with concentric circular arrays to impose beamwidth and frequency invariance constraints. This enables continuous optimization over both angles while maintaining performance across a wide frequency range. We evaluate our method through simulations of beamwidth, white noise gain, and directivity across multiple frequencies. A comparative analysis is presented against standard and advanced beamformers, including delay-and-sum, modified delay-and-sum, a Jacobi-Anger expansion-based method, and a Gaussian window-based gradient descent approach. Our method achieves superior spatial selectivity and narrower mainlobes, particularly in the elevation axis at lower frequencies. These results underscore the effectiveness of our approach in enhancing beamforming performance for acoustic sensing and spatial audio applications requiring precise dual-axis control.

Keywords: beamforming, autograd, concentric circular arrays, frequency invariant.

1. Introducción

El *beamforming* (conformación de haces en castellano) es una técnica de filtrado que permite procesar señales captadas por múltiples receptores para aislar

fuentes espacialmente. En esencia, consiste en combinar las señales provenientes de una matriz de sensores aplicando retardos y ponderaciones, de forma que las ondas procedentes de una dirección específica se refuercen constructivamente, mientras que las provenientes

de otras direcciones se atenúen. Esta técnica se utiliza ampliamente en sistemas de radar, sonar, comunicaciones inalámbricas y micrófonos direccionales, ya que mejora la relación señal-ruido (SNR) y la capacidad de discriminación espacial del sistema, permitiendo enfocar la recepción o transmisión hacia una zona determinada sin necesidad de mover físicamente los sensores.

En el ámbito de la acústica, el *beamforming* se emplea para controlar y dirigir la captación o emisión de sonido mediante *arrays* o arreglos de micrófonos y altavoces. Al ajustar la fase y amplitud de las señales recogidas por cada micrófono, es posible focalizar la sensibilidad del sistema hacia una dirección específica. Esta técnica se aplica tanto en sistemas comerciales como audífonos o dispositivos de reconocimiento de voz, como en entornos profesionales de grabación y análisis acústico. Entre sus aplicaciones más avanzadas se incluyen las cámaras acústicas [1], las redes de sensores basadas en ultrasonidos y los sistemas de sonar avanzado.

Los arreglos planos de micrófonos extienden el principio del *beamforming* al dominio tridimensional, permitiendo controlar de forma independiente el acimut y la elevación del haz. Esta capacidad resulta esencial en sistemas de localización de fuentes sonoras, captura espacial de audio y entornos inmersivos, donde es necesario distinguir señales provenientes de diferentes alturas. A diferencia de los arreglos lineales, que limitan el direccionamiento al plano horizontal, los arreglos planos introducen retardos que compensan tanto las diferencias horizontales como verticales entre micrófonos. No obstante, su implementación presenta desafíos importantes: la resolución espacial depende estrechamente del tamaño y la densidad del arreglo respecto a la longitud de onda, lo que dificulta un control preciso en bajas frecuencias. Además, pequeñas desviaciones en la posición o calibración de los micrófonos pueden generar errores de fase que degradan la direccionalidad del sistema.

Otro de los principales desafíos del *beamforming* acústico proviene de la gran variabilidad de la longitud de onda dentro del rango audible, lo que contrasta con las aplicaciones en radiofrecuencia, donde los diseños suelen optimizarse en torno a una frecuencia central bien definida. Esta característica dificulta mantener un patrón direccional consistente a lo largo de todo el espectro, motivo por el cual numerosos estudios han explorado soluciones orientadas a lograr un *beamforming* invariante en frecuencia.

Una de las estrategias más extendidas consiste en el uso de arreglos diferenciales, que aprovechan las derivadas espaciales del campo sonoro para generar patrones de haz direccionales [2,3]. Sin embargo, este enfoque requiere un espaciado muy reducido entre micrófonos

para aproximar correctamente dichas derivadas, lo que restringe su ancho de banda útil y reduce su rendimiento en bajas frecuencias. Como alternativa, los arreglos circulares concéntricos de micrófonos (CCMA) han mostrado una notable eficacia: su geometría simétrica permite mantener la invariancia en frecuencia en un rango más amplio y, al mismo tiempo, mejora la capacidad de direccionamiento angular. Estudios recientes incluso han combinado las ventajas del *beamforming* diferencial con los CCMA, obteniendo configuraciones híbridas de alto rendimiento [4-6].

Otras estrategias para alcanzar la invariancia en frecuencia se basan en métodos de optimización iterativos, que calculan los coeficientes de ponderación de forma directa sin imponer restricciones diferenciales explícitas [7-9]. En este contexto, la diferenciación automática ofrece un marco particularmente adecuado para resolver problemas de optimización complejos, aunque su aplicación al *beamforming* acústico sigue siendo limitada. Un ejemplo se presenta en [10], donde se emplea para el diseño de arreglos lineales diferenciales de micrófonos.

En este trabajo se propone un nuevo marco de *beamforming* para arreglos circulares concéntricos de micrófonos basado en diferenciación automática. El método permite controlar de forma simultánea el ancho de haz en acimut y elevación, garantizando a la vez una respuesta invariante en frecuencia y una elevada robustez frente al ruido. A diferencia de los enfoques previos, nuestro modelo formula una función objetivo que combina métricas de directividad con términos de regularización adicionales, lo que posibilita un proceso de optimización flexible y eficiente.

2. Modelo de señal y formulación del problema

Se considera un CCMA compuesto por R anillos, cada uno identificado por el índice $r = \{1, 2, \dots, R\}$. El anillo r se define por su radio ρ_r , que determina la posición radial de los micrófonos distribuidos uniformemente a lo largo de su circunferencia. En cada anillo se ubican M_r micrófonos, todos con la misma distancia radial ρ_r pero con una posición angular única $\phi_{r,m}$, donde $m = \{1, \dots, M_r\}$ representa el índice del micrófono y $\phi_{r,m}$ se mide respecto al eje x positivo. La dirección de llegada (DoA) de una fuente sonora se caracteriza mediante dos ángulos: el ángulo de acimut ϕ_0 , medido en el plano paralelo al arreglo desde el eje x , y el ángulo de elevación θ_0 , medido desde el plano horizontal, tal y como se muestra en la Figura 1.

Sea $x(t)$ una onda plana incidente que llega desde la dirección (ϕ_0, θ_0) . Cada micrófono del arreglo registra una

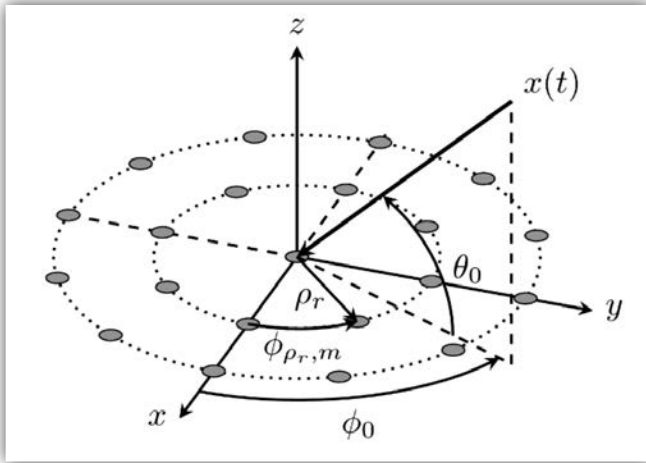


Figura 1. Geometría del problema.

versión retardada y contaminada por ruido de la señal original, tal como se expresa en (1):

$$y_{r,m}(t) = x(t - \tau_{r,m}) + n_{r,m}, \quad (1)$$

donde $n_{r,m}$ representa el ruido y las posibles distorsiones introducidas en la captación. El retardo temporal $\tau_{r,m}$ depende de la posición del micrófono con respecto al centro del arreglo y se define como

$$\tau_{r,m} = -f_s \frac{\rho_r}{c} \sin(\theta_0) \cos(\phi_0 - \phi_{r,m}), \quad (2)$$

donde f_s es la frecuencia de muestreo y c la velocidad del sonido en el medio. Al transformar el modelo al dominio de la frecuencia, se obtiene la relación descrita en (3):

$$Y_{r,m}(f) = X(f) e^{-j2\pi f \tau_{r,m}} + N(f) = X(f) d_{r,m}(f, \theta_0, \phi_0) + N(f), \quad (3)$$

donde $d(f, \theta, \phi)$ denota el vector de direccionamiento (*steering vector* en inglés) correspondiente a la dirección (θ, ϕ) . Agrupando las señales en forma matricial, la expresión del modelo se resume como

$$\mathbf{y}(f) = \mathbf{x}(f) \mathbf{d}(f, \theta, \phi) + \mathbf{n}(f), \quad (4)$$

donde $\mathbf{y}(f)$ y $\mathbf{n}(f)$ son vectores columna que contienen las señales y el ruido de todos los micrófonos, respectivamente. El *beamformer* aplica un conjunto de coeficientes de ponderación, agrupados en el vector $\mathbf{h}(f)$, para obtener la salida combinada del sistema:

$$\mathbf{z}(f) = \mathbf{h}(f)^H (\mathbf{x}(f) \mathbf{d}(f, \theta, \phi) + \mathbf{n}(f)), \quad (5)$$

donde $(\cdot)^H$ denota la transposición conjugada. Para lograr una reconstrucción no distorsionada de la señal proveniente de la dirección deseada, los coeficientes del *beamformer* deben satisfacer la siguiente condición de distorsión nula:

$$\mathbf{h}(f)^H \mathbf{d}(f, \theta, \phi) = 1. \quad (6)$$

3. Métricas de evaluación

El rendimiento de un *array* de micrófonos en tareas de *beamforming* puede analizarse mediante diversas métricas derivadas del patrón de directividad. Dicho patrón, definido en la ecuación (7) describe cómo varía la ganancia del arreglo en función de las coordenadas angulares de acimut (ϕ) y elevación (θ) . El análisis del patrón permite identificar el lóbulo principal, así como los lóbulos secundarios, responsables de la captación de señales no deseadas procedentes de otras direcciones.

$$B(f, \theta, \phi) = \mathbf{h}(f)^H \mathbf{d}(f, \theta, \phi) \quad (7)$$

Otra medida fundamental para caracterizar el desempeño de un *beamformer* es su ancho de haz, el cual determina la resolución angular del lóbulo principal en torno a la dirección de apuntamiento (θ_0, ϕ_0) . De acuerdo con la definición estándar a -3 dB, el ancho de haz se define como la separación angular entre los dos puntos en los que la magnitud del patrón de radiación disminuye hasta $1/\sqrt{2}$ de su valor máximo en la DoA. En particular, los anchos de haz correspondientes a los planos de elevación y acimut se calculan como

$$\Theta_{-3\text{db}}: \frac{|B(f, \theta, \phi_0)|}{|B(f, \theta_0, \phi_0)|} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (8)$$

$$\Phi_{-3\text{db}}: \frac{|B(f, \theta_0, \phi)|}{|B(f, \theta_0, \phi_0)|} = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (9)$$

El valor de Θ se mide sobre el eje de elevación manteniendo fijo el acimut en ϕ_0 , mientras que Φ se mide sobre el eje de acimut manteniendo fija la elevación en θ_0 . En general, anchos de haz más estrechos implican mayor resolución espacial, aunque también suelen conllevar una mayor sensibilidad a desajustes y al ruido.

De forma complementaria, el factor de directividad (*Directivity Factor*, DF) ofrece una medida cuantitativa de la capacidad del arreglo para concentrar la captación en una dirección específica. Se define como la razón entre la ganancia en la dirección de apuntamiento y la ganancia promedio en todas las direcciones de un campo sonoro isotrópico:

$$DF(f) = \frac{|B(f, \theta_0, \phi_0)|^2}{1/4\pi \int_0^\pi \int_0^{2\pi} |B(f, \theta, \phi)|^2 d\phi d\theta}, \quad (10)$$

donde el denominador representa la potencia media radiada sobre la esfera unitaria.

En la práctica, este valor puede aproximarse mediante la matriz de coherencia espacial $\Gamma(f) \in \mathbb{C}^{M \times M}$, definida en un campo difuso como

$$\Gamma_{ij}(f) = \text{sinc}\left(\frac{f l_{ij}}{c}\right), \quad (11)$$

donde l_{ij} es la distancia euclídea entre los micrófonos i y j , y c es la velocidad del sonido. Esto conduce a una expresión cerrada del factor de directividad:

$$DF(f) = \frac{|\mathbf{h}^H(f)\mathbf{d}(f, \theta_0, \phi_0)|^2}{\mathbf{h}^H(f)\Gamma(f)\mathbf{h}(f)}. \quad (12)$$

Por otro lado, la ganancia de ruido blanco (*White Noise Gain*, WNG) evalúa la robustez del *beamformer* frente a ruido no correlacionado espacialmente. Se define como

$$WNG(f) = \frac{|\mathbf{h}^H(f)\mathbf{d}(f, \theta_0, \phi_0)|^2}{\mathbf{h}^H(f)\mathbf{h}(f)}. \quad (13)$$

Un valor elevado de WNG indica que el sistema logra suprimir eficazmente el ruido aditivo sin degradar la respuesta en la dirección deseada. A diferencia del DF, que caracteriza la capacidad de rechazo frente a interferencias difusas, la WNG refleja la sensibilidad del arreglo al ruido interno de los micrófonos. En escala logarítmica, se expresa como

$$WNG_{dB}(f) = 10\log_{10}(WNG(f)). \quad (14)$$

En conjunto, estas métricas proporcionan una descripción complementaria del rendimiento del arreglo: mientras el DF cuantifica su selectividad espacial, la WNG constituye un indicador clave de la robustez del sistema ante condiciones de baja SNR.

4. Diseño del *beamformer*

Para distribuir los micrófonos a lo largo de los anillos se impone una restricción anti-*aliasing*, con el fin de fijar la distancia mínima entre elementos. Al elegir una cuerda mínima de longitud $\lambda_{\min}/2$, se garantiza que el retardo entre micrófonos cubra al menos media longitud de onda de la frecuencia máxima considerada. Como resultado, el número mínimo de micrófonos en cada anillo y sus posiciones angulares correspondientes se determinan como

$$M_r = \left\lceil \frac{\pi}{\arcsin(\lambda_{\min}/(4\rho_r))} \right\rceil, \quad (15)$$

y

$$\phi_{r,m} = 2\pi \frac{m}{M_r}, \quad m = 0, 1, \dots, M_r - 1, \quad (16)$$

respectivamente.

Cada anillo del arreglo de micrófonos aporta de forma distinta al patrón de directividad en función de su radio. Los anillos exteriores, al contar con una apertura mayor, ofrecen una mejor resolución en bajas frecuencias, aunque tienden a sufrir *aliasing* en frecuencias más altas. Por el contrario,

los anillos interiores, al estar más concentrados, capturan con mayor precisión el contenido de altas frecuencias, pero presentan menor resolución en bajas frecuencias.

Para equilibrar estos efectos, se introducen coeficientes de ponderación por anillo dependientes de la frecuencia, $w_r(f)$, que modulan la contribución de cada anillo. Estos coeficientes cumplen $w_r(f) \geq 0$ y $\sum_{r=1}^R w_r(f) = 1$, de modo que pueden interpretarse como contribuciones relativas normalizadas. En la práctica, estos pesos escalan los coeficientes de cada micrófono dentro del anillo, controlando así la apertura efectiva del arreglo en todo el rango de frecuencias.

Dentro de cada anillo, los micrófonos cuya orientación está más próxima a la dirección de apuntamiento reciben mayor ponderación mediante una ventana gaussiana. Siguiendo [8, 11], los coeficientes intra-anillo se definen como

$$s_{r,m}(f) = \exp\left(-\frac{\delta_{r,m}^2}{2\sigma_r^2}\right), \quad (17)$$

donde σ_r^2 regula la anchura de la gaussiana y $\delta_{r,m}$ representa la distancia angular entre la dirección de apuntamiento y la posición angular del micrófono m en el anillo r . La distancia $\delta_{r,m}$ se obtiene a partir de los vectores unitarios asociados a la orientación del micrófono y DoA:

$$\delta_{r,m} = \|\mathbf{v}_{\pi/2, \phi_{r,m}} - \mathbf{v}_{\theta_0, \phi_0}\|_2, \quad (18)$$

con todos los micrófonos ubicados en el plano horizontal ($\theta = \pi/2$) y

$$\mathbf{v}_{\theta, \phi} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\phi \\ \cos\theta\sin\phi \\ \sin\theta \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3. \quad (19)$$

Para evitar discontinuidades en $\pm\pi$, el ángulo $\phi_{r,m}$ se ajusta al intervalo $[\phi_0 - \pi/2, \phi_0 + \pi/2]$. Una vez corregidos los ángulos, las distancias se normalizan de acuerdo con

$$\delta_{r,m} \leftarrow \frac{\delta_{r,m} - \min(\delta)}{\max(\delta)}. \quad (20)$$

Finalmente, al combinar los pesos inter-anillo $w_r(f)$ con los coeficientes gaussianos intra-anillo $s_{r,m}(f)$ y con el término de direccionamiento $d_{r,m}(f, \theta_0, \phi_0)$, se obtiene el coeficiente final por micrófono:

$$h_{r,m}(f) = w_r(f) s_{r,m}(f) d_{r,m}(f, \theta_0, \phi_0). \quad (21)$$

5. Optimización

Para determinar los coeficientes óptimos, se plantea un problema de optimización, donde se minimiza una función de coste mediante el uso de diferenciación automática, implementada con Autograd [12]. Esta herramienta genera dinámicamente un grafo computacional que registra las operaciones sobre los tensores y aplica la

regla de la cadena mediante diferenciación inversa, lo que permite calcular gradientes de forma precisa y eficiente sin recurrir a derivaciones manuales.

La función de coste puede componerse de distintos términos, cada uno enfocado en mejorar diferentes aspectos del desempeño del sistema. Por ejemplo, se puede incluir un término que penalice la distorsión de la señal, otro que limite la fuga de interferencias y, simultáneamente, incorporar restricciones de potencia para mejorar la eficiencia energética. A esto se pueden sumar términos de regularización que promuevan suavidad en la respuesta, asegurando un rendimiento robusto en diversas condiciones. Asignando pesos adecuados a cada término, la función de coste compuesta puede sintonizarse para priorizar características deseadas como nitidez del haz, reducción de lóbulos laterales o mayor estabilidad general del sistema. Formalmente, el problema de optimización propuesto se expresa como

$$\begin{aligned} \Theta_f(\mathbf{w}, \sigma) &\leq \Theta_{BW} \\ \Phi_f(\mathbf{w}, \sigma) &\leq \Phi_{BW} \\ \text{P1: } \min_{\mathbf{w}, \sigma} \mathcal{L}_f(\mathbf{w}, \sigma) \quad \text{s.t.} \quad & \mathbf{1}^T \mathbf{w} = 1 \\ & 0 \leq \mathbf{w} \leq 1 \\ & \sigma \geq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

donde \mathcal{L}_f representa la función de coste evaluada en la frecuencia f , mientras que Θ_f y Φ_f son los anchos de haz a -6 dB en elevación y acimut, respectivamente.

6. Diferenciabilidad y detalles de implementación

Para optimizar funciones que no son intrínsecamente diferenciables, y que por lo tanto no pueden resolverse mediante descenso por gradiente, es necesario recurrir a aproximaciones suaves. Por ejemplo, las expresiones (8) y (9), utilizadas para localizar los puntos a -6 dB y calcular el ancho de haz, involucran la operación sobre una rejilla de muestras, además de indexación en tensores; ambas operaciones no diferenciables. En este caso particular, aproximaciones suaves comunes, como *softmax* o máscaras sigmoideas con temperatura ajustada, no resultaron efectivas debido a su deficiente propagación de gradientes.

Para superar esta limitación, se emplea un sustituto diferenciable basado en un ajuste por mínimos cuadrados ponderados de una parábola sobre la magnitud del patrón de directividad alrededor de la dirección de apuntamiento. Para mejorar el ajuste al lóbulo principal, se utiliza una ventana súper-gaussiana centrada en (θ_0, ϕ_0) suprimiendo así la influencia de los lóbulos laterales. Además, para compensar la variación del ancho de haz a diferentes frecuencias, la ventana se adaptó de manera que fuese más estrecha a frecuencias altas, logrando un ajuste parabólico más preciso.

El procedimiento para estimar el ancho de haz en elevación (Θ), aplicando un método equivalente en acimut (Φ), se describe mediante

$$\Theta = 2 \sqrt{\frac{\Delta L}{|a|}}, \quad (23)$$

donde $a = \frac{W \cdot S_B - S_x \cdot B}{W \cdot S_x^2 - S_x^2}$, con $W = \sum_i w_{i,\theta}$, $S_x = \sum_i w_{i,\theta} x_i^2$, $S_B = \sum_i w_{i,\theta} x_i^2 B_i$ y $B = \sum_i w_{i,\theta} B_i$. Aquí, $w_{i,\theta} = \exp(-1/2 (\theta_i - \theta_0/\sigma_\theta)^4)$, $x_i = \theta_i - \theta_0$, θ_i son los ángulos de elevación discretos, σ_θ es la desviación estándar de la ventana (dependiente de la frecuencia), B_i el valor del *beam pattern* en dB en θ_i y ΔL la diferencia de potencia (por ejemplo, -6 dB). Un ejemplo del ajuste y la estimación resultante del ancho de haz se ilustra en la Figura 2.

Todos los experimentos fueron implementados en PyTorch 2.6.0 [12], utilizando una tasa de aprendizaje de $\eta = 0,1$ en combinación con el algoritmo de descenso por gradiente RProp [13], configurado con parámetros $(\eta^+, \eta^-) = (0,5, 1,2)$ y $(\Gamma_{\max}, \Gamma_{\min}) = (10^{-6}, 50)$.

7. Experimentos y resultados

En los experimentos principales se consideró un *array* de 5 anillos con radios $r = \{0, 5, 10, 15, 20\}$ cm y una frecuencia de muestreo $f_s = 16$ kHz. Los anchos de haz objetivo seleccionados fueron $\Theta_{BW} = \Phi_{BW} = 40^\circ$ y la DoA elegida fue $(\theta_0 = 45^\circ, \phi_0 = 45^\circ)$.

Aprovechando la flexibilidad del marco propuesto, se evaluaron distintas funciones objetivo orientadas a promover la invariancia en frecuencia. Como punto de partida se adoptó el enfoque de [7,8], en el que la función de coste combina un ancho de haz objetivo con el factor de directividad:

$$\mathcal{L}_1 = \begin{cases} \Theta_f & \Theta_f > \Theta_{BW} \text{ \& } \Phi_f \leq \Phi_{BW} \\ \Phi_f & \Theta_f \leq \Theta_{BW} \text{ \& } \Phi_f > \Phi_{BW} \\ -\log_{10} \text{DF} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (24)$$

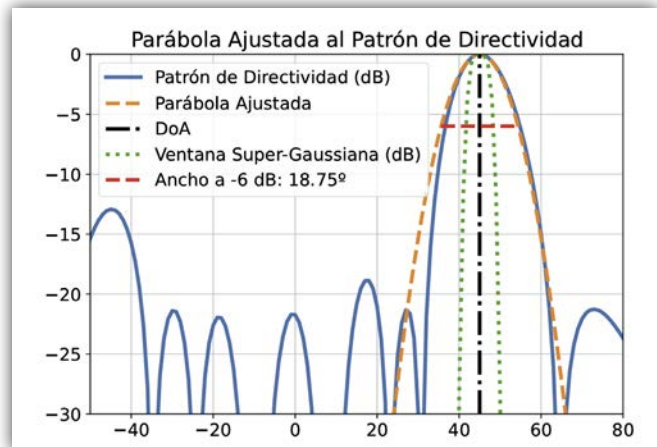


Figura 2. Ejemplo de parábola ajustada al patrón de directividad.

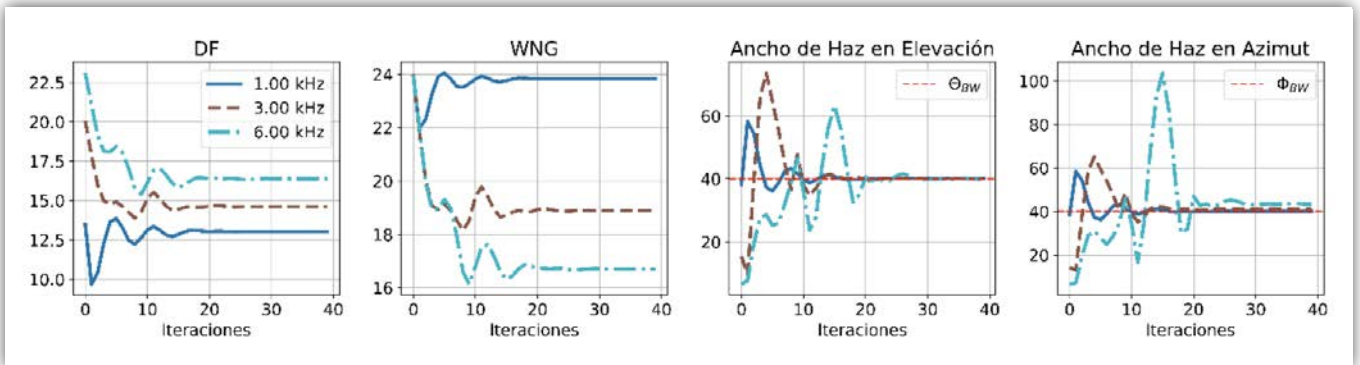


Figura 3. Evolución del desempeño a lo largo de las iteraciones del arreglo base optimizado utilizando \mathcal{L}_1 (24) como función objetivo.

En esta formulación, la función \mathcal{L}_1 actúa de manera adaptativa: maximiza la directividad cuando el ancho de haz cumple con los valores objetivo, mientras que fuerza un lóbulo principal más amplio cuando el haz es demasiado estrecho, evitando así la aparición de lóbulos laterales de gran magnitud. La Figura 3 ilustra la evolución del proceso de optimización al utilizar \mathcal{L}_1 como función de coste.

Adicionalmente, la Figura 4 ilustra esta diferencia: se compara el patrón de directividad en alta frecuencia obtenido con \mathcal{L}_1 frente a una estrategia alternativa \mathcal{L}_2 , que corrige los anchos de haz reduciendo directamente el factor de directividad en lugar de ampliar el lóbulo principal. En ella se puede ver cómo minimizar el factor de directividad da lugar a un mayor número de lóbulos secundarios.

Más allá de estas formulaciones iniciales, se exploró la incorporación de términos adicionales diseñados para garantizar un desempeño más uniforme en todo el rango de frecuencias. Aunque este enfoque puede comprometer ligeramente aquellas bandas con mejor rendimiento, favorece la consistencia global. En particular, se añadieron penalizaciones asociadas a: (i) la desviación estándar de las métricas a lo largo de la frecuencia, y (ii) las diferencias entre bandas adyacentes y opuestas. Para

complementar este criterio, se incorporó la ganancia de ruido blanco (WNG) con un coeficiente de ponderación α que permite balancear de forma controlada la contribución relativa de DF y WNG, siguiendo la estrategia descrita en [9, 14]. De esta forma se define la función de coste completa \mathcal{L}_3 :

$$\mathcal{L}_3 = \begin{cases} \Theta_p & \Theta_f > \Theta_{BW} \text{ \& } \Phi_f \leq \Phi_{BW} \\ \Phi_p & \Theta_f \leq \Theta_{BW} \text{ \& } \Phi_f > \Phi_{BW} \\ P + I + \Delta, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (25)$$

$$P = -\alpha \log_{10} DF - (1 - \alpha) \log_{10} WNG, \quad (26)$$

$$I = \lambda_1 \text{std}(DF) + \lambda_2 \text{std}(WNG), \quad (27)$$

$$\Delta = \lambda_3 \sum_{i=2}^{|F|/2} |P_i - P_{N-i+1}| \quad (28)$$

En esta formulación, P (26) representa el término de desempeño, I (27) el término de invariancia, y Δ (28) el término de regularización entre bandas. Los parámetros $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, controlan la ponderación de cada contribución, mientras que α ajusta el compromiso entre directividad y ganancia de ruido blanco. Nótese que la función \mathcal{L}_1 puede recuperarse como un caso particular al fijar $\alpha = 1$ y $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$.

La Figura 5 presenta el desempeño del *beamformer* para diferentes combinaciones de los coeficientes de regularización de \mathcal{L}_3 . Se observa que, tanto en configuraciones orientadas a maximizar la directividad ($\alpha = 1$) como en aquellas enfocadas en la ganancia de ruido blanco ($\alpha = 0$), el incremento de los términos de invariancia frecuencial (particularmente el asociado a λ_1) contribuye a suavizar la respuesta y reducir las variaciones del desempeño a lo largo del espectro.

La Figura 6 compara los patrones de directividad obtenidos con el método propuesto (AG-GW) y otros enfoques de *beamforming* comúnmente utilizados: el *Delay & Sum*, una versión modificada de este [15], un *beamformer* basado en la expansión de Jacobi-Anger [5, 16] y el método de gradiente modificado presentado en [9] (denominado *Gaussian Window*). La figura muestra

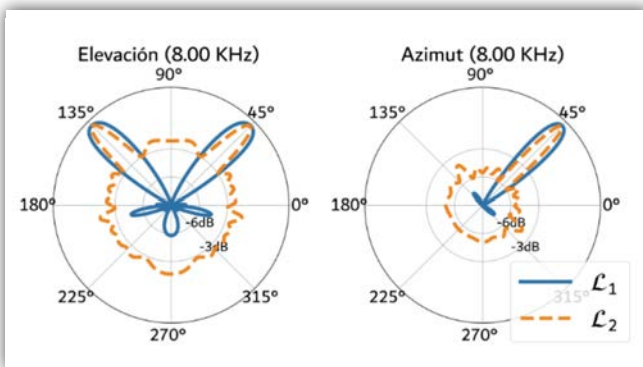


Figura 4. Comparación de patrones de radiación: corrección de anchos de haz menores al objetivo mediante el aumento explícito del lóbulo principal (\mathcal{L}_1) frente a la reducción del factor de directividad (\mathcal{L}_2).

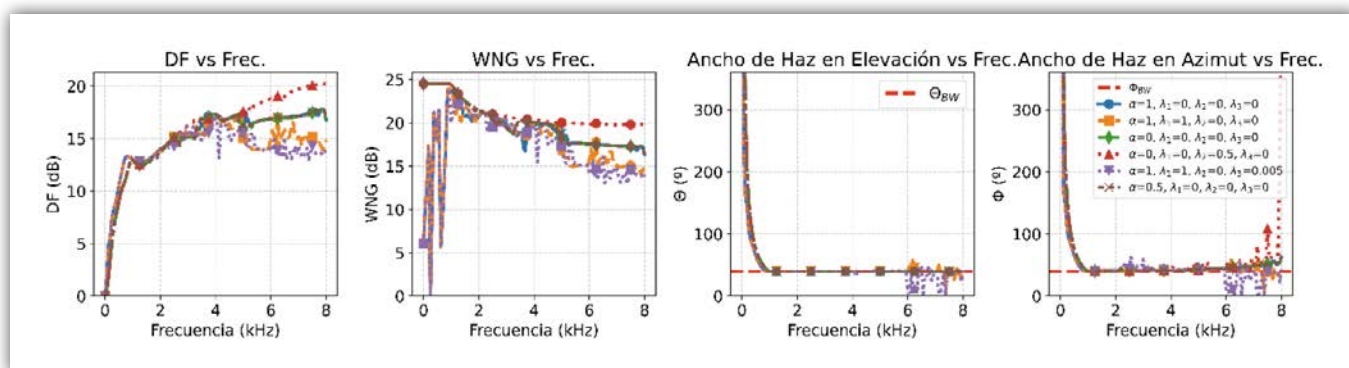


Figura 5. Resultados obtenidos para diferentes parametrizaciones de \mathcal{L}_3 en términos de métricas frente a frecuencia.

las diferencias en selectividad espacial y en el ancho del lóbulo principal, evidenciando que el método propuesto presenta mejoras, especialmente en el eje de elevación a bajas frecuencias.

8. Conclusión

En este trabajo se presenta un marco basado en diferenciación automática para optimizar los pesos de un arreglo concéntrico circular de micrófonos (CCMA), con control explícito del ancho de haz tanto en elevación como en acimut. La metodología permite evaluar de manera flexible distintas funciones de coste y combinaciones de términos de penalización, facilitando el ajuste de los parámetros. La función de coste completa integra un tér-

mino de desempeño P , un término de invariancia I que penaliza la variación de métricas clave como el factor de directividad y la ganancia de ruido blanco a lo largo de la frecuencia, y un término Δ que busca reducir las diferencias entre bandas adyacentes y opuestas.

Los resultados obtenidos demuestran que el enfoque propuesto supera tanto métodos convencionales como procedimientos de gradiente modificados. Al combinar estrategias de *beamforming* diferenciables con el aprovechamiento del diseño simétrico del CCMA, este trabajo representa un avance significativo hacia un *beamforming* robusto e invariante en frecuencia, aplicable a un amplio rango de frecuencias.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por TED2021-131003B-C21 and TED2021-131401A-C22 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por «EU Union NextGeneration EU/PRTR», así como por PID2022-137048OB-C41 and PID2022-137048OA-C43 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y «ERDF A way of making Europe».

Referencias

- [1] Ortigoso Narro J, Moreno R, de la Prida Caballero D, Raiola M, Azpicueta-Ruiz L. 64-MICROPHONE MODULE FOR A MASSIVE ACOUSTIC CAMERA, 2024.
- [2] Chen J, Benesty J, Pan C. On the design and implementation of linear differential microphone arrays. J Acoust Soc Am 2014;136:3097-113. <https://doi.org/10.1121/1.4898429>.
- [3] Benesty J, Chen J, Pan C. Fundamentals of Differential Beamforming. 2016. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1046-0>.

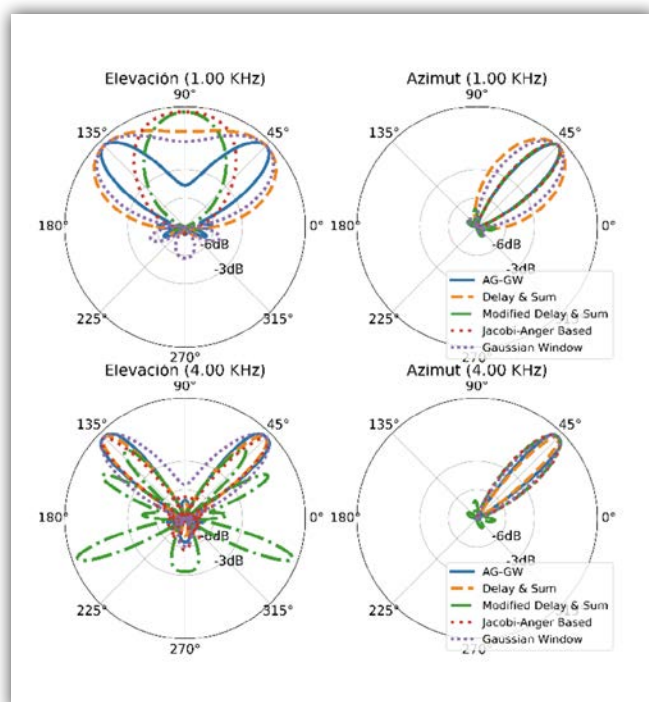
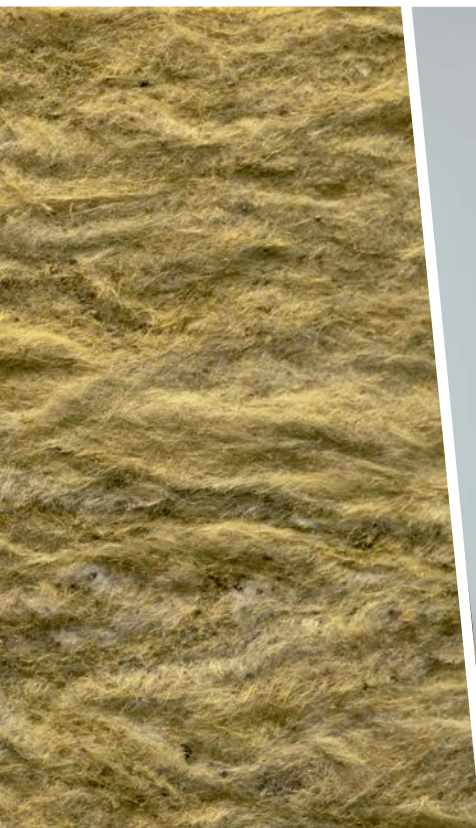


Figura 6. Comparación de los patrones de directividad obtenidos para los diferentes métodos evaluados.

- [4] Lovatello J, Bernardini A, Sarti A. Steerable Circular Differential Microphone Arrays. 2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2018, p. 11-5. <https://doi.org/10.23919/EUSIPCO.2018.8553083>.
- [5] Huang G, Chen J, Benesty J. On the Design of Robust Steerable Frequency-Invariant Beampatterns with Concentric Circular Microphone Arrays. 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2018, p. 506-10. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461297>.
- [6] Parra LC. Steerable frequency-invariant beamforming for arbitrary arrays. J Acoust Soc Am 2006;119:3839-47. <https://doi.org/10.1121/1.2197606>.
- [7] Sharma R, Cohen I, Berdugo B. Controlling Elevation and Azimuth Beamwidths With Concentric Circular Microphone Arrays. IEEE/ACM Trans Audio Speech Lang Process 2021;29:1491-502. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2021.3072275>.
- [8] Sharma R, Cohen I, Berdugo B. Window Beamformer for Sparse Concentric Circular Array. ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2021, p. 4500-4. <https://doi.org/10.1109/ICASSP39728.2021.9414069>.
- [9] Peretz O, Cohen I. Constant Elevation-Beamwidth Beamforming With Concentric Ring Arrays. IEEE/ACM Trans Audio Speech Lang Process 2024;32:1662-72. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2024.3365390>.
- [10] Siminfar SG, Duraiswami R. Applying Automatic Differentiation to Optimize Differential Microphone Array Designs 2024.
- [11] Long T, Cohen I, Berdugo B, Yang Y, Chen J. Window-Based Constant Beamwidth Beamformer. Sensors 2019;19. <https://doi.org/10.3390/s19092091>.
- [12] Paszke A, Gross S, Chintala S, Chanan G, Yang E, DeVito Z, et al. Automatic differentiation in PyTorch. NIPS-W, 2017.
- [13] Riedmiller M, Braun H. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the RPROP algorithm. IEEE International Conference on Neural Networks, 1993, p. 586-91 vol.1. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1993.298623>.
- [14] Frank A, Cohen I. Constant-Beamwidth Kronecker Product Beamforming With Nonuniform Planar Arrays. Frontiers in Signal Processing 2022;2:829463. <https://doi.org/10.3389/frsip.2022.829463>.
- [15] Yang Y, Sun C, Wan C. Theoretical and experimental studies on broadband constant beamwidth beamforming for circular arrays. Oceans 2003. Celebrating the Past ... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No.03CH37492), vol. 3, 2003, p. 1647-1653 Vol.3. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2003.178124>.
- [16] Huang G, Chen J, Benesty J. Insights Into Frequency-Invariant Beamforming With Concentric Circular Microphone Arrays. IEEE/ACM Trans Audio Speech Lang Process 2018;26:2305-18. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2018.2862826>.

Gama Roxul, soluciones para el confort acústico

100%
LANA DE
ROCA



Soluciones de aislamiento para el confort térmico y acústico en sistemas de placa de yeso laminado

Los productos de lana de roca ROCKWOOL ofrecen **excelentes prestaciones acústicas, térmicas y de protección contra incendios**. Además, cuentan con la certificación **Indoor Air Comfort Gold** de Eurofins, lo que garantiza la **calidad del aire interior** del edificio y permite crear ambientes más saludables.

La lana de roca, gracias a su **estabilidad dimensional**, permanece inalterable ante variaciones de humedad y temperatura. No se dilata ni se contrae, no absorbe agua ni vapor de agua, y **conserva sus propiedades a lo largo de toda la vida** útil del edificio.

Los paneles de aislamiento ROCKWOOL están disponibles en un amplio rango de densidades para adaptarse a los diferentes niveles de **absorción acústica**, así como a los requisitos de cada proyecto y actividad.

26 ensayos para el confort acústico en particiones verticales distributivas, separativas, fachadas, suelos y forjados, bajantes y ascensores o montacargas.



Descubre más en: rockwool.es

Centenario de la primera medición de ruido. Desde el decibel y el fono hasta el decibelio

Centenary of the first noise measurement. From decibel and phon to decibelio



Walter Alfredo Montano Rodríguez^{1*}

¹ ARQUICUST Laboratorio de acústica «Joseph Sauveur». Gualeguaychú, ER, Argentina

* Contacto: wmontano@arquicust.com

Resumen

En este artículo se explora la historia de la medición del sonido y la evolución de la palabra «decibelio» en España. Se detalla la aparición, en 1925 en Estados Unidos, del primer medidor de sonido portátil, que estaba basado en audiómetros modificados cuya escala era «unidades de sensación». El equipo desarrollado en Alemania, en cambio, utilizó el «Phon». Se explican las cuestiones idiomáticas que dieron lugar a que en 1929 se adoptara la palabra «bel» como unidad de medida, y el proceso de castellanización que culminó con la palabra «decibelio», que se introdujo en 1931. En Europa los medidores de sonido conservaron el phon como unidad de medida para regular el ruido, y así se hizo también en España. El artículo termina con el personaje «Don Decibelius», presentado en 1960 en la televisión española. Parece ser que el nombre es una referencia al decibelio, y que inspiró el nombre de una actividad pedagógica del Ayuntamiento de Madrid (Don Decibelio) en 2005.

Palabras clave: acústica, historia de la ciencia, bell, decibelio, filosofía de la tecnología.

Abstract

This article explores the history of sound measurement and the evolution of the term «decibel» in Spain. It details the 1925 appearance of the first portable sound meter in the United States. This meter was based on modified audiometers whose scale was «units of sensation». Conversely, the equipment developed in Germany used the «phon». The article also explains the linguistic considerations that led to the adoption of the word «bel» as a unit of measurement in 1929 and the Spanish adaptation that resulted in the word «decibel», introduced in 1931. In Europe, sound meters retained the phon as the unit of measurement for regulating noise, and this was also the case in Spain. The article concludes with the character «Don Decibelius», who was introduced on Spanish television in 1960. The name appears to be a reference to the decibel and inspired the name of an educational activity by the Madrid City Council in 2005, «Don Decibelio».

Keywords: acoustics, history of science, bell, decibel, philosophy of technology.

1. Introducción

Los primeros medidores de sonido del siglo XIX eran una combinación de dispositivos ópticos con partes rotativas y otros con filtros resonantes que utilizaban llamas de gas, tubos de órganos, etc. Estos equipos estaban limitados al análisis de sonidos puros, ya que todos (incluidos los ópticos) eran medidores sintonizados mecánicamente. No fue hasta la aparición de los rectificadores, el galvanómetro, las válvulas electrónicas y los micrófonos de condensador calibrables, que se consiguió un aparato que fuera capaz de medir sonidos de banda ancha con precisión y sin distorsión.

En sus orígenes, en la década de 1920, a los medidores de sonido se los identificó como «medidores de vibraciones», ya que se asociaban con la capacidad de medir las vibraciones del aire producidas por las ondas sonoras. Floyd Alburn Firestone (1898-1986), después de dos años de desarrollo (Rich, 1925), presentó en enero de 1925 el primer medidor portátil de sonido y vibraciones (JSAE, 1925), que fue diseñado para medir el ruido de engranajes y, por lo tanto, no tenía filtros de ponderación que emularan la respuesta del oído. Así se abrió, hace cien años, la era de la medición del nivel sonoro y el ruido.

El diseño de Firestone no fue continuado, probablemente debido a los derechos de patente, pero la Western

Electric ya estaba experimentando con la modificación de un audiómetro para medir el sonido. Al principio, las mediciones de sonido estaban asociadas a la audibilidad y la subjetividad de la escucha, por lo que la unidad de medida se llamó «unidad de sensación» o SU (por sus siglas en inglés, *Sensation Units*). Así se mantuvo hasta 1929, cuando se introdujeron pequeñas modificaciones matemáticas y la unidad de medida pasó a ser el *bel*, y su décima parte se denominó *decibel*. En Alemania, en 1925, se presentó también un medidor de sonido con circuitos electrónicos –basado en la teoría de la electricidad de baja tensión– cuya unidad de medida era el «Phon» (con una escala diferente a la actual). Esta unidad se basaba en la Ley de Weber-Fechner (Barkhausen, 1926) y se utilizó durante varias décadas, hasta que fue sustituida por la normalización internacional.

El tema central de este artículo es el desarrollo terminológico de la palabra decibelio. Cabe destacar que en la terminología acústica de los países de Latinoamérica se adoptó la palabra «decibel», tomada directamente del inglés, cuyo plural es «decibeles». Sin embargo, en España, dicho término fue castellanizado como «decibelio», incorporándose así al lenguaje técnico de las telecomunicaciones. Este término no tuvo un camino fácil para imponerse en el campo de la acústica, y aquí se comentará su trayectoria, que tiene aristas particulares y curiosas, entre las que se incluye un personaje televisivo de 1960.

2. La búsqueda de un parámetro de referencia para la medida del sonido

Antes de hablar sobre la unidad de medición del sonido, se comentará cómo se perfeccionaron los transductores para convertir una onda acústica en una onda eléctrica, que es esencialmente lo que hacen los micrófonos, lo que permitió que el nivel de presión sonora se convirtiera en una forma apropiada para medir el sonido.

El músico y teórico de la música Étienne Loulié (1654-1702) inventó en 1693 un aparato al que llamó *sonomètre* (sonómetro), y que fue utilizado para afinar instrumentos. Dicho aparato permitía conocer (rudimentariamente) la nota musical interpretada por medio de una cuerda, cuñas y una regla. La invención fue abandonada en 1711 debido a la introducción del diapasón. En 1827, el médico y físico francés Félix Savart (1791-1841) perfeccionó el sonómetro de Loulié para poder determinar la frecuencia del sonido de cualquier instrumento. Esto se consiguió por coincidencia mecánica, modificando la tensión de la cuerda para cambiar la frecuencia emitida mediante la acción de pesas. A partir de 1846, este aparato se utilizó durante décadas en los conservatorios de música y en los laboratorios de física

experimental de España (Montano, 2024). Por lo tanto, en sus orígenes, el «sonómetro» era un aparato destinado a medir la frecuencia de las notas musicales.

2.1. La invención del micrófono y de un aparato para medir el sonido

El físico e inventor inglés Charles Wheatstone (1802-1875) acuñó e introdujo el término «micrófono» en 1827 en su artículo *Experiments on Audition*, en el que especificaba que «para construir un instrumento que, por hacer audibles los sonidos más débiles, puede llamarse apropiadamente micrófono» (Wheatstone, 1827, p. 69), aunque en realidad se refería a transmisión acústica (al igual que un estetoscopio). El primer transductor capaz de convertir una señal acústica a una señal eléctrica fue inventado en 1854 por Antonio Meucci (1808-1889) para su proto-teléfono, al cual denominó «teletrófono», y que perfeccionó en 1871 (Correos, n.d.). Graham Bell se basó en este equipo –aunque básicamente era el mismo dispositivo– para patentar el teléfono en 1876 como propio (Mundo, 1888). Bell le dio al micrófono de su teléfono el nombre de «receptor» (*receiver*). Dado que la conversión era mecánico-eléctrica, la transconductancia del sistema era muy baja, resultando en una elevada distorsión del sonido transmitido.

David Edward Hughes (1830-1900), otro físico e inventor inglés, descubrió que las vibraciones producidas por el movimiento de un diafragma modificaban la resistencia del carbón. Al conectarlo a una pila, se transmitía una señal eléctrica proporcional a las vibraciones, lo que permitía obtener un sonido con baja distorsión. Dado que servía para amplificar señales débiles, lo presentó en 1878 como «micrófono», retomando la palabra e idea de Wheatstone (MIT, n.d.). Este equipo se considera como el primer micrófono propiamente dicho (Nature, 1879). Posteriormente inventó un dispositivo electromagnético y mecánico que permitía escuchar sonidos y «medirlos» usando la barra reglada de un variador, al que denominó *sonometer* (medidor de sonido). Este equipo no dio lugar a buenos resultados, ya que no tenía una fuente de referencia sonora fija que le permitiese establecer un umbral de comparación. Meses más tarde, y por recomendación de un amigo médico, modificó el dispositivo para medir la audibilidad (Richardson, 1879, p. 65), cambiando su nombre a *audimeter* (audiómetro). Se tiene constancia de que un audiómetro con variaciones no especificadas se utilizó en Barcelona en 1907 para medir el ruido de los rayos durante tormentas (Guillén-García, 1907).

2.2. Primeras unidades de medida del sonido

A principios del siglo XX, Max K. W. Wien (1866-1938) desarrolló, fundamentándose en la Ley de Weber-Fechner,

una escala con unidades de presión en dinas/cm² (Wien, 1903) –más tarde nombrada *Wiens*– que es similar a la escala de sones actual. Aunque su ajuste mecánico, eléctrico y neumático era una labor tediosa, sentó las bases científicas y tecnológicas de cómo lograr una fuente de referencia de presión con la que medir el sonido.

Las unidades de sensación SU

En 1921, Harvey Fletcher (1884-1981), que estaba perfeccionando el audiómetro electrónico con Raymond Lester Wegel (1888-1973), descubrió que un aumento del 12 % en la presión o del 25 % en la intensidad del sonido suponía un incremento apenas perceptible para el oído, como función de paso (o salto) para un oyente entrenado. Descubrieron que $(10\log(1,25))$ o $(20\log(1,12))$ se acercaban a una posible unidad de medida, que bautizaron como «unidad de sensación» (*Sensation Unit*) y abreviaron como SU. En esta nueva escala, un cambio de 5 SU era claramente perceptible por un oyente (Fletcher & Wegel, 1922). Este salto se utilizó como paso principal en un audiómetro (el modelo 2A de la Western Electric) que se modificó en 1925 (Figura 1-a) para medir el ruido dentro de un vehículo y detectar la fuente de molestia (Lemon, 1925), y que se convirtió en el modelo 3A.

La Siemens en Alemania y el Phon

Heinrich G. Barkhausen (1881-1956) fue un destacado científico alemán que desarrolló y perfeccionó entre 1925 y 1927 un medidor de sonido (Figura 1-b) basado en bajas corrientes. Considerando primero la escala de *Wien* y, posteriormente, teniendo en cuenta la Ley psicofísica de Weber-Fechner, descubrió que podía utilizar logaritmos de base 2 para introducir una escala en su medidor (comercializado por la Siemens & Halke), en la que cada unidad indicaba la duplicación del «volumen percibido»,

a la cual llamó «Phon» (Barkhausen, 1926) (Barkhausen & Steudel, 1933). Esta escala era similar a la del decibelio, pero no guarda relación metrológica con la definición actual del *phon*. Aunque la unidad de medida era el phon, a menudo se indicaba como decibel con el símbolo dB, y fue utilizada hasta mediados de la década del 60. Esta escala de medida también se utilizó en España, donde el término fue traducido a «fono».

3. Del Bell al bel y la introducción del decibel en 1929

Los trabajos de Fletcher y su equipo en la Western Electric se centraban en mejorar la calidad del sonido transmitido por el sistema telefónico, por lo que, en sus inicios, el estudio de la audibilidad y la inteligibilidad estuvieron asociados a la comunicación telefónica. En 1925 la AT&T se fusionó con la Western Electric para crear la compañía *Bell Telephone Laboratories* (BTL). Un grupo de transmisión denominado «Largas Distancias» (*Long Lines*) ya había cuantificado en 1924 la proporción de potencia perdida en una milla de cable estándar, a la que denominaron «unidad de transmisión» (*Transmission Unit*-TU). Para facilitar las transmisiones, se consideró adecuado compatibilizar dicha unidad con la «unidad de sensación» SU que se utilizaba en la medición del sonido. Fletcher y su grupo se dieron cuenta de que la unidad de transmisión TU y la unidad de sensación SU eran similares. En 1927, llegaron a la conclusión de que lo ideal sería trabajar con una única unidad de medida y determinaron que con un ligero ajuste matemático (el $10\log$) la relación de potencia perdida podría dar una unidad de transmisión válida para ambas necesidades (Stewart & Montano, 2025), que bautizaron como «Bell», en honor al inventor.

El nacimiento de esta unidad provocó un conflicto idiomático no previsto, representado en la anécdota relatada

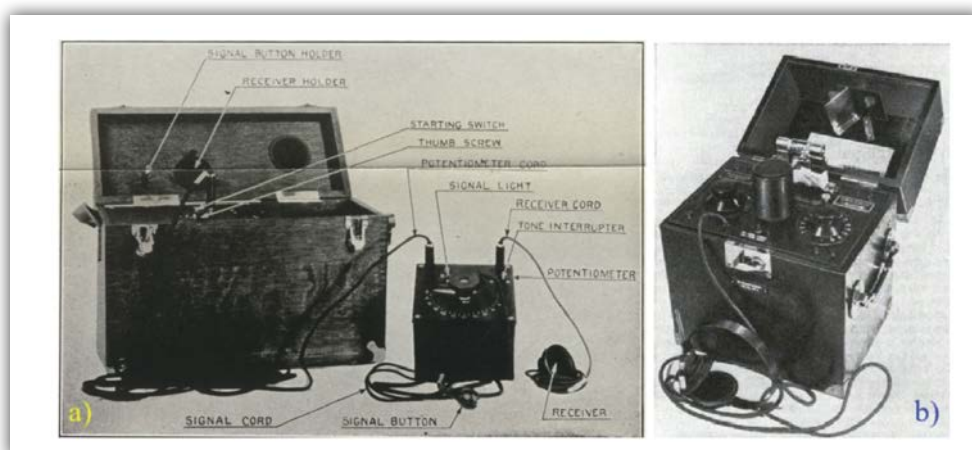


Figura 1. Primeros audiómetros modificados introducidos en 1925 para medir el sonido: a) Western Electric 3A audiometer, medidor en escala de SU (Lemon, 1925); b) Siemens-Geräuschmessers, medidor en Phon según escala de Barkhausen (Börner, 2017).

por Philip Dickinson (2006), en la que cuenta que, cuando los ingenieros franceses de la Bell fueron informados de que la unidad de transmisión se llamaba «Bell», no estuvieron conformes, debido a que su pronunciación es muy cercana a la palabra *belle*, que significa bella en francés. Finalmente, la BTL decidió cambiar el término a «bel», que se incluyó en el vocabulario técnico en 1929, junto con su décima parte llamada «decibel» (Martin, 1929).

Esta unidad de medida para telefonía llamó la atención de la prensa española y, en un artículo de la revista Madrid Científico de abril de 1932, que explicaba el significado del decibel, se comenta irónicamente la aparición de la palabra «bel» diciendo: «que bel era, con mala ortografía, el apellido de Graham Bell, el inventor del teléfono. Para no confundir los ingleses la nueva unidad de medida con la campana, que se escribe bell, en el idioma de Shakespeare, le quitaron la / final», agregando que «sin pararse a pensar que los franceses pudieran interpretar la palabra como el adjetivo *belle* y piropear inconscientemente a la nueva unidad de sonido» (Ansaldó, 1932), evidenciando así que la anécdota tuvo cierta difusión entre los ingenieros españoles de la época.

4. Castellanización de la palabra *decibel* a «decibelio» en 1931

Hasta principios de la década de 1930, la unidad de medida para la transmisión de líneas telefónicas en Europa era el *napier*, basado en el logaritmo natural. Sin embargo, dado que los cálculos matemáticos necesarios para el decibel eran más ventajosos, esta unidad de medida fue adoptada rápidamente a nivel internacional, tal y como se expone en el Boletín de Ingeniería N° 174, publicado en agosto de 1931 por la Compañía Telefónica Nacional de España (CTNE), con el título «El decibelio (dB). Pérdidas y ganancias de transmisión» (CTNE, 1931).

Este Boletín también explica por qué se castellanizó la palabra decibel a decibelio y, en la Figura 2-a, se puede ver el extracto de los párrafos que dan razón de ello. No se conoce la autoría de este documento.

Se tiene constancia de que el ingeniero de telecomunicaciones José Ruiz de Gopegui y Gil, nacido en Burgos en 1895 (Nebreda Perdiguero, 2016, 270) y fallecido en Madrid en 1970, escribió un artículo para el diario El Debate en diciembre de 1935 en el que afirmaba que «La palabra “decibelio” fue escrita por primera vez en lengua castellana por el autor de este artículo en un trabajo que vio la luz en la revista “Ingeniería y Construcción” hace unos cuatro años» (sic) (Gopegui, 1935). El artículo al que hace referencia (ver Figura 2-b) fue publicado en abril de 1932 y es un resumen del mencionado Boletín de Ingeniería (Gopegui, 1932). Gopegui dio muchas conferencias centradas en las telecomunicaciones a lo largo de su vida e ingresó en el Patronato «Juan de la Cierva» del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en el momento de su creación, formando parte de la comisión de «Electrotecnia e hidroeléctrica» (CSIC, 1942, 129).

5. El «decibelio» ingresa al diccionario de la RAE en 1956

En 1933 apareció la primera definición del decibelio en uno de los suplementos de la Enciclopedia Universal Ilustrada Espasa, donde se definió como «unidad de transmisión telefónica que representa la variación de energía sonora» (ver Figura 3-a). Esta definición no incluía su uso en las pérdidas de las líneas telefónicas (Enciclopedia, 1933, 1453). Posteriormente, apareció mencionado en columnas técnicas de diarios y revistas.

Un artículo periodístico publicado en noviembre de 1950 asocia la palabra decibelio con don Andrés Lara Sáenz, uno de los ingenieros del Instituto Torres Quevedo

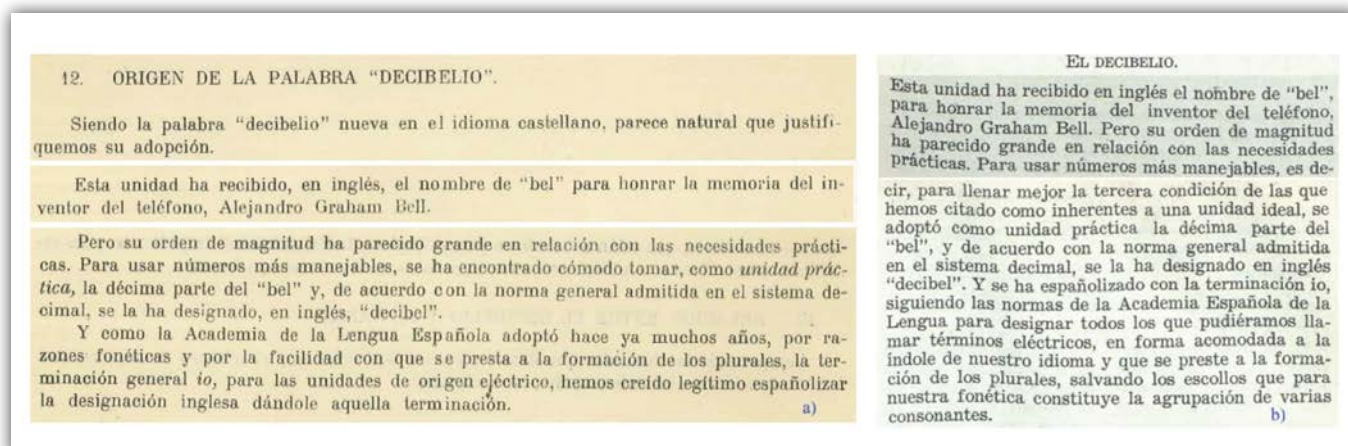


Figura 2. Aparición de la palabra «decibelio» en castellano: a) agosto de 1931; b) abril de 1932.

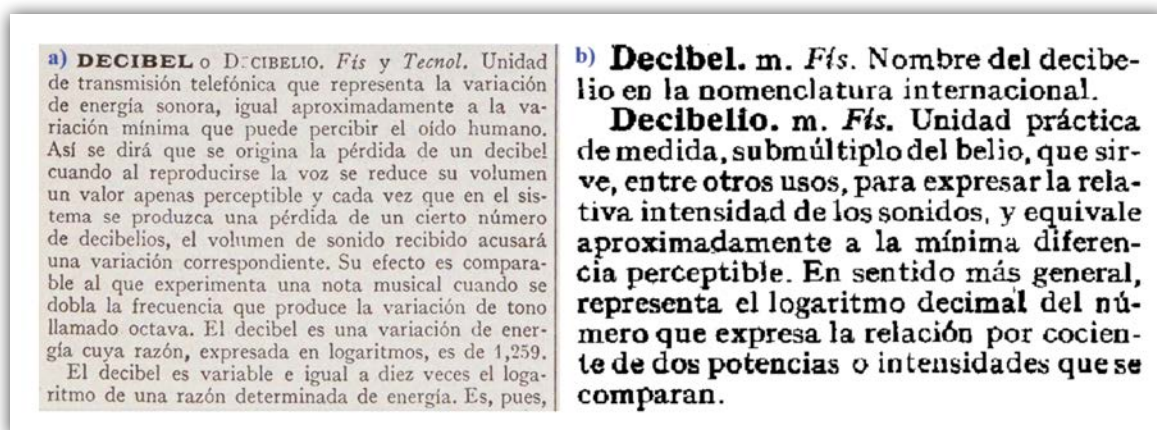


Figura 3. Primeras definiciones del «decibelio»: a) Enciclopedia Universal Ilustrada de 1933; b) Diccionario de la RAE de 1956.

que diseñó el micrófono (y el preamplificador) que utilizó el papa Pío XII para dar sus homilias y discursos durante su visita a España. En dicho artículo, que versa respecto al micrófono, se dice que «proporciona una ganancia de 45 decibelios en la zona de 20 a 10.000 ciclos por segundo, con un margen de un decibelio» (Vanguardia, 1950). A través del contrafáctico, podemos inferir que don Andrés fue protagonista en el uso y difusión de esta palabra.

El «decibelio» se incorpora oficialmente al diccionario de la Real Academia Española en 1956 (ver Figura 3-b), en su decimoctava edición (RAE, 1956, 492), donde se definió como una unidad que «sirve, entre otros usos, para expresar la relativa intensidad de los sonidos». Una vez más, no se menciona su uso en las líneas telefónicas.

6. El Phon («fono») como unidad para limitación de ruido

En junio de 1937, a petición de la Organización de Salud de la Liga de las Naciones (instituciones previas a la OMS y a la ONU), se reunió un grupo de especialistas en acústica y médicos con el objetivo de establecer medidas globales para combatir el ruido (Montano, 2022). Tras considerar las referencias de múltiples países, se presentó una tabla con la sonoridad de distintos tipos de ruido en unidades de «decibels or phons». En el documento se indica que el decibel se utilizaba en EE.UU. y el Phon en los países europeos, y que son dos unidades diferentes que se empleaban indistintamente en ese documento (LNHO, 1937-a, 542). A continuación, transcribieron los límites de ruido que existían en algunos países europeos, todos ellos con el Phon como unidad de medida, lo que probablemente era consecuencia de que en Europa se utilizaba el medidor de la Siemens desarrollado por Barkhausen, cuya escala de medida era el phon.

Un resumen de este documento se tradujo al castellano y, lamentablemente, presenta muchos términos

técnicos con significados incorrectos. Por ejemplo, en la tabla mencionada, en vez de sonoridad indica que son valores de potencia y que la unidad es el decibel. Además, para los límites de ruido, se ha utilizado la palabra «fones» (LNHO, 1937-b, 160).

Tras la publicación de este documento de la Liga de las Naciones, aparecieron en la prensa española incontables artículos que mencionaban que el Phon era la unidad de medida del ruido y/o del sonido, y que se usaba para fiscalizar los niveles de ruido en Berlín y otras ciudades europeas. Algunos medios españoles escribieron indistintamente la palabra «fono», «fonos» o «fones» para referirse al phon.

6.1. Los pedidos de fonómetros en 1957

En el número 54(1-2) de esta revista publiqué un artículo comentando las acciones antirruído llevadas a cabo mediante campañas con la publicación de «Bandos del silencio» (Montano, 2023). La campaña con mayor impacto y difusión en España fue la del Ayuntamiento de Madrid de 1956, en la que se pretendía multar a los vehículos ruidosos, como ya se estaba haciendo en otras ciudades europeas desde 1954. Teóricamente, los vehículos ruidosos se determinaban midiendo el ruido con fonómetros (en referencia directa a la unidad «fono»). Teniendo en cuenta que el ayuntamiento no poseía tales aparatos, las multas se aplicaban a criterio del policía, como se puede ver en la Figura 4-a, en la que el humorista muestra de forma sarcástica una situación contradictoria: un policía pretende multar al conductor de un coche mientras la música de la feria a la que quiere acceder produce un nivel mayor de ruido.

Dicha campaña continuó durante 1957 con la esperanza de disponer de un fonómetro para medir el nivel de ruido de motocicletas y automóviles. Al respecto, el diario madrileño YA del 8 de septiembre de 1957 escribió: «Gran expectación por presenciar, en el paseo de coches



Figura 4. Reacciones en la prensa por la falta de fonómetros para medir el ruido: a) Viñeta humorística de agosto de 1956; b) Solicitud, en septiembre de 1957, para medir todas las fuentes de ruido.

del Retiro, el funcionamiento del fonómetro», pero, tal y como se puede observar en la Figura 4-b, el 23 de septiembre del mismo año todavía no se había presentado el fonómetro al público.

6.2. El fono y el fonómetro. Los límites de ruido para motocicletas en 1960 y 1965

El 2 de julio de 1960, se publicó la orden del Ministerio de Industria «por la que se dan las normas sobre comprobación y límites máximos de ruido producidos por motocicletas» (ver Figura 5-a). Estos niveles de ruido se medían en «fonos», siguiendo el ejemplo de Alemania, donde se utilizaba el Phon. En el artículo mencionado que se publicó

en esta revista, se muestran fotografías de 1962 en las que aparece el fonómetro diseñado y construido por el ingeniero de telecomunicaciones Francisco Iglesias, que era el jefe del Departamento de Didáctica del Instituto Torres Quevedo (información proporcionada por Antonio Pérez López). Este fonómetro se utilizaba para fiscalizar el ruido de las motocicletas en las calles (Albacete, 1962). En un diario de febrero de 1965 se menciona el uso de estos fonómetros (ver Figura 5-b), pero la unidad de medición a la que se refieren es el decibelio. La orden de 1960 fue actualizada en julio de 1965, y se establecieron límites de ruido en unidades de fonos.

La escala del «Phon», traducida como fono, que fue creada en Alemania y se utilizaba en algunos sonóme-



Figura 5. a) Límites de ruido para motocicletas de 1960 en unidades de fonos; b) Uso de fonómetros del Instituto «Torres Quevedo» para mediciones de ruido mencionando unidades en decibelios en 1965.

tros europeos, difería de la escala del decibelio, por lo que daba lugar a confusiones metrológicas. Según una crónica periodística de agosto de 1965, este problema se abordó en el Instituto Torres Quevedo. Probablemente, don Andrés Lara y su equipo de acústicos llevaron la discusión a las autoridades, ya que «resulta que existe una unidad de medida que está en el fono o el decibelio. Los sabios del Torres Quevedo han establecido una equivalencia entre ambas medidas y con ellas van por ahí aplicándolas (...)» (Corbalán, 1965). Por tanto, los límites de ruido establecidos en esas leyes de fiscalización se referían al fono derivado de la escala del «Phon» y no de la escala basada en decibelios.

7. «Don Decibelius» o «Don Decibelio»: Un personaje televisivo de 1960

Es evidente que la problemática del ruido y la necesidad de medirlo para controlarlo mediante límites legales estaban presentes en el periodismo, por lo que es probable que términos como fono y decibelio se convirtieran en palabras de uso común.

En la temporada 1960-1961, TVE emitió un programa llamado «Cuarta dimensión», que actualmente se considera innovador y moderno para la época en que se emitió. Entre sus secciones, una en particular es de interés: a cada invitado se le regalaba un muñeco que se llamaba

«Don Decibelius» (ver Figura 6-a). Este personaje fue muy popular en la televisión española, y la revista Tele-Radio del 14 noviembre de 1960 publicó un reportaje imaginario con Don Decibelius, en el que se le presenta como un personaje que hablaba con gran extravagancia e ironía, en un tono surrealista y hasta divagante (Chuchi, 1960).

Llama la atención que la palabra «decibelius» se parezca a «decibelios», por lo que se podría deducir que hacía referencia indirecta al decibelio, teniendo en cuenta el carácter irónico del personaje. Según un diario de 1960, «Don Decibelio» proviene de la unidad de medida del sonido (Figura 6-b). En la Figura 6-c se ven dos policías municipales midiendo el ruido de los vehículos en la Plaza Mayor de Mallorca en 1962. El medidor que utilizan es similar al GenRad 759-B, fabricado en Estados Unidos hasta 1952. Puede que este equipo se trate de algún modelo de otra marca con características similares.

8. Ordenanza de Madrid de 1969. El «decibelio» como unidad de medida legal

Dado que la legislación de 1960 se refería a unidades en «fonos» y no en «decibelios», el autor de este artículo le preguntó a Antonio Pérez López si recordaba qué término se utilizaba en esa fecha. Contestó que el uso de la palabra decibelio era conocido, ya que lo había



estudiado en la asignatura «Óptica y Acústica» cuando cursó la licenciatura de Física, y añadió: «Lo tengo bien grabado en mi memoria, porque en octubre de 1959 la primera pregunta que me hizo Don Andrés Lara durante la entrevista para ingresar al Torres Quevedo fue *¿Usted sabe lo que es el decibelio?*». Con la aportación de Pérez López queda claro que en los ámbitos académicos se utilizaba la palabra «decibelio». Además, no se debe olvidar que Gopegui estaba en el CSIC desde 1940, por lo que se puede asegurar el uso del término en dicha institución.

Tras años de peticiones por parte de la ciudadanía, los especialistas y la prensa, en 1968 el alcalde de Madrid, Conde de Mayalde, encargó la creación de un comité para redactar una ordenanza que regulara los ruidos en la capital. En dicho comité participaron, en representación del Instituto de Acústica L. Torres Quevedo, los físicos acústicos Antonio Pérez López y José Salvador Santiago. La ordenanza se aprobó en abril de 1969 y estableció los límites de ruido en unidades de decibelios (Pueblo, 1969), por lo que quedó instaurado en la legislación española que el «decibelio» es la palabra que define la unidad de medida del sonido.

9. «Don Decibelio» en las campañas de concienciación del ruido

En 2005, el Ayuntamiento de Madrid publicó una guía para el profesorado llamada «Educar para vivir sin ruido», que incluía actividades para realizar en los colegios. La actividad nº 3 se llama *Don Decibelio* y se indica que es «una simpática unidad de medida del sonido, nos guiará para llevar a cabo un diagnóstico del ruido ambiental en nuestro centro». La propuesta consiste en que un coordinador se identifique como Don Decibelio para llevar a cabo la actividad pedagógica de explicar la unidad de medida y los niveles de ruido, entre otras labores (Ayuntamiento, 2005).

En muchas escuelas de España, Don Decibelio también se utiliza para explicar los niveles de ruido durante las campañas de concienciación sobre el ruido, siguiendo la guía educativa del Ayuntamiento de Madrid. Con este mismo nombre, existe también una aplicación para teléfonos móviles que mide el nivel de ruido (Hackdash, n.d.).

10. Conclusiones

España tardó casi treinta años en tener un medidor de sonido. En 2025 se conmemora el centenario de la primera medición de ruido y este artículo rinde homenaje a los pioneros que desarrollaron un aparato fiable para convertir las ondas acústicas en señales eléctricas y poder medir

por medios electrónicos el nivel de presión sonora. Este fue el método más adecuado que permitió la tecnología de las décadas de 1920 y 1930.

Este artículo también destaca las figuras del ingeniero José Ruiz de Gopegui y Gil como uno de los primeros en utilizar la palabra «decibelio» en España, y la de don Andrés Lara Sáenz, como acústico probablemente responsable de su difusión en los institutos vinculados al CSIC. Es llamativo que, tanto en la enciclopedia de 1933 como en el diccionario de la RAE de 1956, la definición del decibelio se centre en su uso como parámetro de medición del sonido y la audibilidad, a pesar de que este término fue introducido en la jerga técnica a partir de la teoría de la pérdida de energía en líneas de transmisión telefónica de larga distancia.

Lamentablemente, no se conservan grabaciones del programa «Cuarta dimensión», por lo que no es posible conocer los pormenores del personaje «Don Decibelius», nacido de la imaginación de los artistas. Respecto a la revista Tele-Radio, el autor consiguió el ejemplar que contiene la entrevista imaginaria.

En correos intercambiados con Antonio Pérez López, comenta que no recuerda que llamaran «fonómetro» al medidor de sonido que construyeron en 1962 en el Instituto Torres Quevedo, pero que es posible que la prensa considerara que un medidor de «fonos» debería llamarse «fonómetro».

Obviamente, no hay forma de verificar si el Don Decibelio de la guía educativa de Madrid de 2005 está inspirado en el personaje televisivo Don Decibelius de 1960. Tal vez el inconsciente colectivo lo rememoró o es pura y simple coincidencia.

Agradecimientos

El autor quiere agradecer a Antonio Pérez López por compartir sus recuerdos; a revisores y editor de la *Revista de Acústica* de la SEA, por las sugerencias, observaciones y la publicación de este artículo.

Responsabilidad

Se presenta bajo una única agenda de pura investigación acústica en *Historia de la ciencia*. Se declara que no existen conflictos de intereses (siempre se mencionan las fuentes de datos), y tanto la investigación como la redacción del artículo no tuvieron financiamiento, se hizo en el tiempo libre del autor. El autor es socio de la SEA y Chair del *Comité de Archivo e Historia* de la ASA, y también integra la asociaciones acústicas de Argentina (AdAA) y Uruguay (AUA).

Referencias

- Albacete (1962) Va a ser medido, limitado y sancionado el ruido del tráfico. La voz de Albacete, 20 de marzo de 1962: 6. https://prensahistorica.mcu.es/es/consulta/resultados_ocr.do
- Ansaldo, José María (1932) Decibel. Madrid científico 1932; 1303: 97-98. <https://hemerotecadigital.bne.es/hd/es/advanced>
- Ayuntamiento (2005) Educar para vivir sin ruido. Guía del profesorado. Dirección General de Sostenibilidad y Agenda 21. Ayuntamiento de Madrid. https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Educacion_Ambiental/ContenidosBasicos/Publicaciones/EducarVivirSinRuido_RuidosSonidosCiudad/Gu%C3%ADAp profesorado.pdf
- Barkhausen, H. v (1926) Ein neuer Schallmesser für die Praxis. Ein neuer Schallmesser für die Praxis. Zeitschr. f. technische Physik, 7 (1926) 12, S. 599-601.
- Barkhausen, H. v; Steudel, T. U. (1933) Die lautstärke von geräuschen. Hochfrequenz-technik und Elektro-Akustik. Elektroakustik 41, pp. 115-116.
- Börner, Herbert. «Barkhausen-Phon» - was ist denn das?. Funkgeschichte 2017; 40(2359): 201-203.
- Chuchi (1960) Don Decibelius, un señor del día de mañana, que es pasado mañana. Una entrevista de mentirijillas con este célebre personaje. Revista Tele-Radio N° 151. 14 de noviembre de 1960; 16-17.
- Corbalán, Pablo (1965) *Madrid... al aparato. Ruidos y más ruidos*. Diario El noticiero universal (7 de agosto de 1965), p. 2.
- Correos (n.d.) Antonio Meucci, el verdadero inventor del teléfono. Sociedad Estatal Correos y Telegrafos, S.A. <https://museopostalytelegrafico.es/antonio-meucci-el-verdadero-inventor-del-telefono/>
- CSIC (1942) Patronato «Juan de la Cierva Codorniu» Comisiones. Memoria de la secretaría general 1940-1941. 1942: 129. https://www.csic.es/sites/default/files/d7/articulos/1940_1941.pdf
- CTNE (1931) El decibelio (dB) Pérdidas y ganancias de transmisión. Departamento de Ingeniería. Sección de transmisión. Boletín de ingeniería N° 174. <https://historiatelefonía.com/wp-content/uploads/2015/06/boletin-de-ingenieria-000-174-el-decibelio.pdf>
- Dickinson, Philip J. (2006) Changes and challenges in environmental noise measurement. Acoustics Australia 2006; 34(3): 125-129.
- Enciclopedia (1933) Decibel o decibelio. Enciclopedia Universal Ilustrada Espasa. Tomo IX (Apéndice). <https://archive.org/details/enciclopediauniv0003unse/page/1476/mode/2up>
- Fletcher, H.; Wegel, R. L. The frequency-sensitivity of normal ears. The Physical Review. 1922; XIX(6): 553-565.
- Gopegui y Gil, José Ruiz de (1932) Unidades de transmisión. El neper y el decibelio. Ingeniería y Construcción, abril de 1932; X(112): 190-195. <https://hemerotecadigital.bne.es/hd/es/advanced>
- Gopegui y Gil, José Ruiz de (1935) Un indicador visual del volumen del sonido. Radiotelefonía. Suplemento, El Debate 29 de diciembre de 1935, pág. 12. <https://hemerotecadigital.bne.es/hd/es/advanced>
- Guillén-García, Guillermo J. de (1907) Empleo de las ondas hertzianas ... Memoria RACAB, años 1907-1908.
- Hackdash (n.d.) Don Decibelio. MP15Hack <https://hackdash.org/projects/56546f80b513015e0384c29c>
- JSAE (1925) Firestone describes noise evaluator. Journal of the SAE Feb 1925; XVI(2): 121
- Lemon, B. J. (1925) Glimpses of Balloon-Tire Progress. Journal of the Society of Automotive Engineers 1925; XVI(2): 172-182.
- LNHO (1937-a) Report on noise and housing. The hygiene of housing. Bulletin of the Health Organisation of the League of Nations Aug 1937; VI: 541-550. <https://deriv.nls.uk/dcn23/1913/0563/191305637.23.pdf>
- LNHO (1937-b) El ruido y la salud pública. Boletín mensual de la Sociedad de las Naciones junio de 1937: 160.
- Martin, W.H. (1929) Decibel - The name for the Transmission Unit. Bell System Tech. J. 1929; 8: 1-2.
- Montano, Walter (2022) 85th Anniversary of the First International Noise Policy. Noise News International Dec2022; 30(4): 6-12. https://noisenewsinternational.net/wp-content/uploads/2023/01/NNI_298_December2022.pdf
- Montano, Walter (2023) Desde los Bandos del silencio hasta la primera Ordenanza contra el ruido de Madrid. Revista de Acústica julio 2023; 54(1-2): 3-14. <https://documentacion.sea-acustica.es/storage/publicaciones/tecniacustica-54-1-2.pdf>
- Montano, Walter (2024) Reconstruyendo la historia de la Acústica en España durante los siglos XVIII y XIX. Revista de Acústica. SEA 2024; 55(3 y 4): 21-32. <https://documentacion.sea-acustica.es/storage/publicaciones/675a123812370.pdf>
- Mundo, El (1888) El inventor del teléfono. Diario El Mundo 23 de enero de 1888; 253: 1. <https://hemerotecadigital.bne.es/hd/es/advanced>
- Nature (1879) *The Audiometer*. Nature 20, 102-103. <https://doi.org/10.1038/020102a0>

Nebreda Perdiguero, Emiliano (2016) *Amo a mi pueblo. la provincia de Burgos: Sus pueblos, su historia, sus personas, sus iglesias*. Tomo I. Rico Adrados, S.I. <https://www.archiburgos.es/wp-content/uploads/amo-a-mi-pueblo.pdf>

Pueblo (1969) Aprobada la ordenanza contra el ruido. Diario del Trabajo Nacional, 1º de mayo de 1969: 16. <https://hemerotecadigital.bne.es/hd/es/advanced>

RAE (n.d.) Nuevo tesoro lexicográfico de la lengua española, consulta «decibelio». <https://apps2.rae.es/ntlle/SrvltGUILoginNtlle>

Rich, D. L. (1925) The measurement of noises. The Michigan Technic May 1925; 38(4): 14-28.

Richardson, B. W. (1879) Some Researches with Professor Hughes' New Instrument for the Measurement of Hea-

ring; the Audiometer. Proceedings of the Royal Society of London 29: 65-70. <http://www.jstor.org/stable/1113736>

Stewart, Noral D.; Montano, Walter A. (2025) The decibel and beyond-Early progress in sound measurement and analysis. J. Acoust. Soc. Am. 157, A198 April 01, 2025 - Volume 157, Issue 4_Supplement.

Vanguardia, La (1950) El micrófono. Su Santidad Pío XII ha recibido en audiencia privada a los señores Bilbao e Ibáñez Martín. La Vanguardia Española (4 de noviembre de 1950), p. 10.

Wien, M. K.W. (1903) Ueber die empfindlichkeit des menschlichen Ohres für töne verschiedener Höhe. Aus dem Physik. Archiv für Physiologie 97, 1-57.



Envíese a: **Revista Española de Acústica - SEA**
e-mail: secretaria@sea-acustica.es
<http://www.sea-acustica.es>

Estoy interesado en:

- **ASOCIARME A LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA** ☐
- **SUSCRIBIRME A LA REVISTA DE ACÚSTICA** ☐

Apellidos: _____ Nombre: _____

Dirección para correspondencia: _____

C.P.: _____ Ciudad: _____ Provincia: _____

Tel.: _____ Fax: _____ e-mail: _____

Centro de trabajo: _____

Puesto de trabajo: _____

Dirección: _____

C.P.: _____ Ciudad: _____ Provincia: _____

Tel.: _____ Fax: _____ e-mail: _____

MEDIR RUIDO ES FÁCIL.

MEDIRLO BIEN, NO TANTO.

NOSOTROS TENEMOS LA SOLUCIÓN



SRA

SENSOR DE RUIDO AMBIENTAL

- Análisis espectral en 1/3 de octava.
- Monitorización continua y autónoma.
- Visualización de datos en tiempo real.
- Análisis rápido, inteligente e interactivo.
- Diseño compacto y resistente.



Resumen del Congreso Forum Acusticum Euronoise 2025



Durante cuatro intensos días, del 23 al 26 de junio de 2025, Málaga ha latido al ritmo de la acústica mundial. La ciudad andaluza ha sido el escenario del **Forum Acusticum / Euronoise 2025**, un evento de gran magnitud que no solo ha supuesto la 11ª Convención de la *European Acoustics Association* (EAA), sino que también ha servido de marco para nuestro querido 56º Congreso Español de Acústica (Tecniacústica 2025). Bajo la batuta organizativa de la **Sociedad Española de Acústica (SEA)**, actuando en representación de la EAA, y con el sólido respaldo de la **Universidad de Málaga** y el **Ayuntamiento** de la ciudad, el encuentro ha destacado tanto por su excelencia científica como por la calidez humana.

El **Palacio de Ferias y Congresos de Málaga (FYC-MA)**, con su arquitectura moderna y funcional, resultó ser el anfitrión perfecto para albergar un congreso de tales dimensiones, proporcionando espacios que invitaron al intercambio de ideas y al reencuentro entre colegas.

La Cantera Caliente Motores: EAA Summer School

Antes de que los focos del congreso se encendieran, el futuro de nuestra disciplina ya se estaba forjando en las aulas. Durante el fin de semana del 21 y 22 de junio, la Universidad de Málaga acogió la **EAA Summer School**, un hervidero de talento joven coordinado magistralmente por el equipo de Belén Casla, Laura Estévez y Mª Ángeles Navacerrada.

El programa académico fue de una altura excepcional. Mientras Maarten Hornikx, apoyado por Francesco Martellota y Silvin Willemsen, sentaba cátedra en el módulo de *Fundamentos*, las aulas de los ocho «Hot Topics» bullían con los temas más punteros.

Tuvimos el lujo de contar con Antonio J. Torija, Simone Torresin y Daniel de la Prida desgranando los secretos de la investigación perceptual (HT3); o a Eduardo Latorre-Iglesias, Robert Arcos y Arnau Clot abordando la vibroacústica desde un enfoque práctico (HT5). La vanguardia tecnológica estuvo representada por Manuel Rosa-Zurera, Hamid Krim, Maximo Cobos, Mirco Pezzoli e Iván López-Espejo, quienes profundizaron en el procesamiento de señal (HT1); mientras que la revolución de los

metamateriales (HT2) corrió a cargo de un equipo de lujo formado por Luis Godinho, Ruben Picó, Jean-Philippe Groby y Paulo Amado Mendes.



La magia de «dibujar con sonido» mediante hologramas acústicos (HT4) fue revelada por Noé Jiménez, Alicia Carrión y Alba Eroles, al tiempo que Efrén Fernández-Grande, Samuel Verburg y Elias Zea instruían a los alumnos en los métodos más avanzados de medida y reconstrucción de campos sonoros (HT8).



No menos interesante fue la perspectiva sobre ruido y salud urbana (HT6) que nos brindaron Laura Estévez-Mauriz y Martin Röösli, junto a Benjamin Fenech y Efsthathios

Margaritis. Contamos también con un interesantísimo curso sobre Inteligencia Artificial (HT7), donde Rosa Ma. Alsina-Pagès y Ester Vidaña-Vila, acompañadas por Gaetano Licitra y Pierre Aumond, mostraron cómo los algoritmos están redefiniendo nuestra disciplina.



El programa se completó con conferencias plenarias, como la de Hamid Krim, y mesas redondas sobre desarrollo profesional con Juan Negreira, Elif Özcan y Alexander Díaz-Chyla, inspirando a las nuevas generaciones de acústicos.

Una Inauguración para el Recuerdo

La mañana del lunes 23, el auditorio principal del FYC-MA se vistió de gala. La mesa presidencial reunió a la representación del **Ayuntamiento de Málaga**; al profesor **Dick Botteldooren**, presidente de la EAA; y a los máximos responsables del congreso, **Antonio Pedrero** y **María Machimbarrena**, presidente y secretaria general respectivamente, quienes dieron la bienvenida a una comunidad internacional expectante.



Hubo momentos de auténtica emoción, como cuando el profesor **Avraham Hirschberg** subió al estrado para recibir el **EAA Award for Lifetime Achievements in Acoustics**. Tras una sentida *laudatio* de Xavier Pelorson, Hirschberg recibió el aplauso cerrado de la comunidad por toda una vida dedicada a desentrañar los misterios de la aeroacústica musical. Acto seguido, se miró al futuro con la entrega de las **EAA Travel Grants**, becas que permitieron la asistencia de brillantes jóvenes investigadores como Alessia Nora, Alexandra Lysele Montenegro, Javier Ángel Navarro-Calvo o Zeynep Ozturk, entre otros.



Y como la acústica es ciencia, pero también arte, la **Joven Orquesta Provincial de Málaga (JOPMA)** deleitó a los presentes con una interpretación vibrante y precisa. Su repertorio recorrió algunas de las cimas más importantes de la música clásica y española. Nos llevaron de la intensidad de Verdi (*La forza del destino*) y Wagner (*Rienzi*) a la evocación de Mendelssohn (*Las Hébridas*) y el virtuosismo de Liszt (*Rapsodia Húngara n.º 2*). El broche final, con el *Intermedio de La boda de Luis Alonso* de Gerónimo Giménez, dejó el ambiente cargado de energía y alegría española.



Ciencia de Vanguardia y su Legado Escrito

Las cifras avalan el éxito rotundo de la convocatoria: **1250 congresistas** y casi **un millar de comunicaciones científicas** presentadas (834 orales y 164 pósteres). El programa científico, vertebrado en **24 temas principales** y **139 sesiones estructuradas**, ofreció una panorámica exhaustiva del estado del arte. Mención especial merecen las cuatro conferencias plenarias, que marcaron el ritmo de cada jornada: desde los paisajes sonoros submarinos de la **Dra. Ana Širović** hasta las aplicaciones médicas de los hologramas acústicos del **Dr. Noé Jiménez**, pasando por la omnipresente IA con el **Prof. Mark Plumbley** y la nueva visión de los paisajes sonoros urbanos del **Prof. Francesco Aletta**.



Todo este conocimiento ha quedado recogido para la posteridad en el **Libro de Actas (Proceedings of Forum Acusticum Euronoise 2025)**. Editado por **Daniel de la Prida, Jaime Ramis y María Machimbarrena** (ISSN: 3005-7124; ISBN: 978-84-87985-35-5), tras un arduo proceso de revisión técnica por expertos y formal por la organización, este volumen constituye ya la referencia palpable del evento.

La actividad también bullía fuera de las salas de ponencias. La **Exposición Técnica** fue un ir y venir constante de profesionales que visitaban los fabulosos stands de más de una treintena de anunciantes, entre los que se encontraban **Mason Industries** como *Gold Sponsor*, **AMC Mecanocaucho**, **DataKustik**, **DEMCON**, **HEAD acoustics**, **Intecon**, **Metecno**, **Rion**, **Norsonic**, **Regupol**, **Saint-Gobain**, **SEE**, **Senor y Treble** como *Silver Sponsors* y **Bedrock**, **Casella**, **CESVA**, **cdm Stravitrec**, **dBelectronics**, **dGmR**, **GRAS**, **IAG**, **IMS**, **Metacoustic**, **Microflown Technologies**, **Odeon**, **Meta Reality Labs**, **sevenBel**, **SONITUS Systems**, **SoundPLAN**, **Track-Noise** y **Viblen**, como *Standard Sponsors*.

Otros eventos satélites, como el simposio sobre **Acústica de la Edificación**, los **NM-Days**, el **Forum Laboris** o la experiencia inmersiva «**Vaulted Harmonies**» enriquecieron la oferta. Quienes buscaban experiencias diferentes pudieron redescubrir Málaga a través del oído gracias a los **Soundwalks**.



Convivencia social bajo el Sol de Málaga

Pero, si algo distingue a nuestros congresos, eso es la calidez humana, y Málaga nos brindó el escenario ideal para estrechar lazos. El programa social arrancó el lunes con un **Cóctel de Bienvenida** en el patio del FYCMA, coincidiendo con la noche de San Juan. Bajo el cielo malagueño, las conversaciones fluían entre viejos amigos y nuevos colegas. El martes, la formalidad académica dio paso a la espontaneidad y la música tomó el protagonismo en la **Sala Trinchera** con una increíble *Jam Session*. En este evento, nuestros acústicos cambiaron el sonómetro por la guitarra, demostrando que el talento musical en nuestra comunidad es tan abundante como el científico.

Sin embargo, el momento culminante llegó el miércoles con la **Cena de Gala**. El lugar elegido no podía ser más evocador: el **Balneario de los Baños del Carmen**. En este marco incomparable a orillas del Mediterráneo, los asistentes disfrutaron de una velada exquisita. La gastronomía local deleitó nuestros paladares, pero fue el espectáculo de **flamenco** el que cautivó nuestros sentidos, arrancando «oles» y aplausos en una noche donde la hermandad entre todos los acústicos europeos se sentía en el aire.



Durante la conferencia, los acompañantes de los ponentes no se quedaron atrás, disfrutando de un programa

cultural que los llevó a explorar desde la majestuosa Alcazaba hasta los tesoros del Museo Picasso, sin olvidar una relajante travesía en catamarán por la bahía.

Clausura y Mirada al Futuro

Todo lo bueno tiene un final, y el jueves 26 nos reunimos para la clausura. En la mesa, **María Machimbarrena, Antonio Pedrero, Dick Botteldooren y Luis Godinho** hicieron balance de unos días intensos y fructíferos. Fue el momento de reconocer la excelencia de los más jóvenes con los **Best Student Paper Awards**, patrocinados por la **Head-Genuit Foundation**. Los galardonados, **Ilaria Fichera, Jorge Ortigoso Narro, Julián Peláez Quiñones, María Centeno Cerrato, Pablo Miguel Ayala y Taous Iatariene**, subieron al estrado para recoger sus diplomas, confirmando que el futuro de la acústica está en muy buenas manos. Para poder hacer partícipes a todos los lectores de la Revista de Acústica de las impresionantes investigaciones de estos jóvenes acústicos, este número incluye traducciones, por parte de los autores, de cuatro de estas comunicaciones ganadoras. La Revista de Acústica agradece a estos jóvenes la buena disposición a traducir e incluir sus investigaciones en este número.



Con la satisfacción del deber cumplido, nos despedimos emplazándonos para las próximas citas: **Graz** (Austria) nos espera en 2026 y, un año más tarde, nos encontraremos en **Bruselas** (Bélgica) en una aventura conjunta de las sociedades europea (EAA) y americana (ASA).

Desde la **Sociedad Española de Acústica**, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a cada colaborador, ponente, expositor y congresista. Todos juntos hemos hecho de este Forum Acusticum / Euronoise 2025 no solo un hito científico, sino una experiencia vital inolvidable. ¡Hasta la próxima!



AAC CENTRO DE ACÚSTICA APLICADA

Ingeniería + Laboratorio



Gran experiencia en resolución de situaciones complejas
Amplio alcance de ensayos acreditados ENAC desde 1996
Expertos en combinación de mediciones y modelos

Parque Tecnológico de Euskadi
VITORIA-GASTEIZ – España
TEL. (+34) 945 298 233
aac@aacacustica.com
www.aacacustica.com
Sucursal en Colombia

TRABAJAMOS PARA QUE TU FUTURO SUENE MEJOR



Distribuidor de **SoundPLAN** en España y Portugal

EL SOFTWARE DE ACÚSTICA ADECUADO PARA CADA NECESIDAD

Modelos SoundPLAN: Noise 9.1 (modular) / Essential 6.0 / Manda 1.0

La oferta más completa con la mejor relación calidad / precio

Ruido Ambiental / Acústica de Salas / Ruido Laboral

Solicita una licencia de prueba

soundplan@aacacustica.com



Computational Acoustic Intelligence: AI-Powered Sound Signal Processing for Industrial, Automotive, and Daily-Life Applications

Tribunal:

Presidenta: María de Diego Antón, Universitat Politècnica de València.

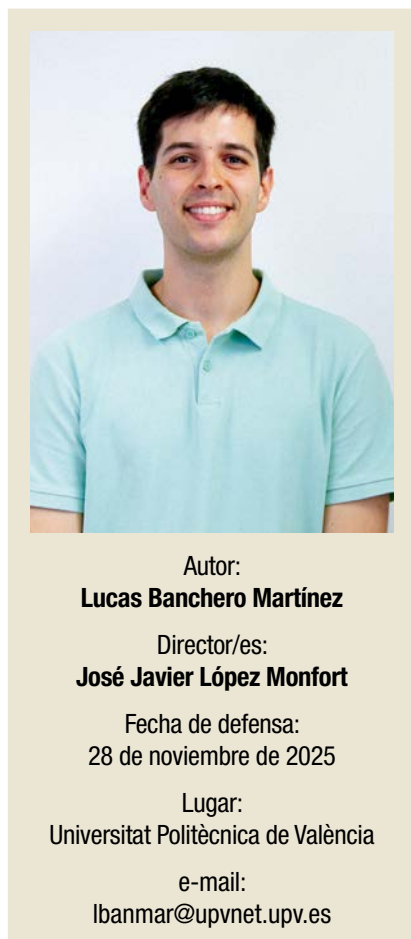
Secretario: Manuel Rosa Zurera, Universidad de Alcalá.

Vocal: José Ramón Beltrán Blázquez, Universidad de Zaragoza.

Resumen:

Esta tesis explora el creciente campo de la Inteligencia Acústica Computacional, centrándose en la aplicación de técnicas avanzadas de Inteligencia Artificial (IA) a señales de audio no semánticas y no musicales. La investigación aborda desafíos críticos en entornos reales mediante el desarrollo de sistemas robustos para la detección, localización y análisis de sonidos en contextos industriales, automotrices y de ciencias del deporte. Los métodos tradicionales de procesamiento de audio a menudo presentan limitaciones frente a altos niveles de ruido ambiental, condiciones dinámicas y escenarios acústicos complejos. Este trabajo propone y valida soluciones innovadoras que integran modelos de aprendizaje profundo, como los *Audio Spectrogram Transformers* (AST) y las Redes Neuronales Convolucionales (CNN), con hardware especializado y *pipelines* de procesamiento de señal para superar dichas limitaciones.

Las contribuciones principales se presentan a través de tres dominios de aplicación distintos, pero



Autor:

Lucas Bancho Martínez

Director/es:

José Javier López Monfort

Fecha de defensa:

28 de noviembre de 2025

Lugar:

Universitat Politècnica de València

e-mail:

lbanmar@upvnet.upv.es

interconectados. Primero, se desarrolla un Sistema Avanzado de Asistencia al Conductor (ADAS) para la detección y localización en tiempo real de vehículos de emergencia. Este sistema combina una novedosa carcasa aerodinámica para micrófonos, que mitiga el ruido del viento, con un *pipeline* de IA en múltiples etapas, proporcionando a los conductores información situacional crítica. Segundo, se diseña un

Sistema Inteligente de Protección Auditiva que preserva la conciencia del usuario en entornos industriales ruidosos.

Este sistema aborda el dilema de la «sobrepotección» mediante la detección selectiva, el aislamiento y la reintroducción espacial de sonidos críticos, como alarmas y voces, utilizando una combinación de modelos de separación de fuentes y Funciones de Transferencia Relacionadas con la Cabeza (HRTF). Tercero, como estudio fundamental, se presenta un sistema para medir la altura de salto de atletas a partir de señales de audio, demostrando el potencial de la IA en ciencias del deporte para un monitoreo de rendimiento preciso y accesible.

A lo largo de estas aplicaciones, la tesis desarrolla y evalúa de manera sistemática metodologías para la extracción de características (espectrogramas Mel, GCC-PHAT), detección de eventos sonoros (CNNs, AST), localización de fuentes sonoras (ResNet-18) y mejora de señales (U-Net, DEMUCS). La investigación culmina con la creación de sistemas completos de extremo a extremo, validados con conjuntos de datos extensos que incluyen datos del mundo real, semi-sintéticos y sintéticos. Los resultados demuestran alta precisión y robustez, abriendo el camino para el despliegue práctico de sistemas acústicos potenciados por IA que mejoran la seguridad, el rendimiento y la interacción humano-ambiente.

Abstract:

This thesis explores the emerging field of Computational Acoustic Intelligence, focusing on the application of advanced Artificial Intelligence (AI) techniques to non-semantic and non-musical audio signals. The research addresses critical challenges in real-world environments by developing robust systems for sound detection, localization, and analysis in industrial, automotive, and sports science contexts. Traditional audio processing methods often falter in the presence of high ambient noise, dynamic conditions, and complex acoustic scenes. This work proposes and validates novel solutions that integrate deep learning models, such as Audio Spectrogram Transformers (AST) and Convolutional Neural Networks (CNNs), with specialized hardware and signal processing pipelines to overcome these limitations.

The core contributions are presented through three distinct, yet interconnected, application domains. First, an Advanced Driver Assistance System (ADAS) is developed for the real-time detection and localization of emergency vehicles. This system combines a novel aerodynamic microphone housing to mitigate wind noise with a multi-stage AI pipeline, providing drivers with crucial situational awareness. Second, an Intelligent Hearing Protection System is designed to preserve user awareness in noisy industrial environments. This system tackles the «overprotection» dilemma by selectively detecting, isolating, and spatially reintroducing critical sounds like alarms and speech using a combination of source separation models and Head-Related Transfer Functions (HRTFs). Third, as a foundational study, a system for measuring athletic jump height using audio signals is presented, demonstrating the potential of AI in sports science for accurate and accessible performance monitoring.

Throughout these applications, this thesis systematically develops and evaluates methodologies for feature extraction (Mel spectrograms, GCC-PHAT), sound event detection (CNNs, AST), sound source localization (ResNet-18), and signal enhancement (U-Net, DEMUCS). The research culminates in the creation of complete, end-to-end systems validated with extensive datasets, including real-world, semi-synthetic, and synthetic data. The results demonstrate high accuracy and robustness, paving the way for the practical deployment of AI-powered acoustic systems that enhance safety, performance, and human-environment interaction.

Large-scale sound field reconstruction (Reconstrucción de campos acústicos a gran escala)

Tribunal:

Hüseyin Hacıhabiboglu, Universidad Técnica del Medio Oriente, Turquía.

Roland Badeau, Escuela Nacional Superior de Telecomunicaciones, Francia.

Jonas Brunskog, Universidad Técnica de Dinamarca, Dinamarca.

Resumen:

Los recientes avances en tecnología acústica y de audio han aumentado la demanda de una caracterización exhaustiva de las propiedades del campo acústico en dominios extensos, como salas y auditorios. Muchas aplicaciones que hoy en día requieren conocer la presión acústica en cada punto del dominio incluyen control activo de audio, preservación del patrimonio acústico, diseño acústico de salas y audio espacial navegable. Sin embargo, la adquisición de datos acústicos es un proceso experimentalmente difícil, ya que para caracterizar completamente una sala estándar se necesitan cientos de millones de mediciones.

Esta tesis aborda estos retos mediante el desarrollo de técnicas de reconstrucción de campos sonoros a gran escala. Estas técnicas tienen como objetivo reducir el esfuerzo experimental mediante la predicción de las variables y magnitudes acústicas



Autor:

Antonio Figueroa

Director/es:

Efrén Fernández Grande

Finn T. Agerkvist

Tapio Lokki

Fecha de defensa:

5 de mayo de 2025

Lugar:

Universidad Técnica de Dinamarca

e-mail:

antonio.figueroa@upm.es

en posiciones en las que no se pueden realizar mediciones directas. La primera parte de la tesis se centra en reducir el número de mediciones experimentales y maximizar al mismo tiempo el área de reconstrucción

mucho más allá del dominio de medición. Con este fin, proponemos un método que se basa en la estructura temporal generalizable del sonido en las salas, logrando una reconstrucción individual a gran escala de las reflexiones más importantes lejos de los puntos de medida y preservando las propiedades estadísticas de la reverberación en todo el dominio de reconstrucción.

La segunda parte del estudio examina diversas estrategias a la hora de modelar el campo acústico, considerando que las propiedades acústicas del dominio de reconstrucción pueden variar considerablemente entre salas. En este contexto, la tesis profundiza en la naturaleza específica de los datos experimentales disponibles para informar y adaptar los métodos de reconstrucción de campo. Se propone una formulación bayesiana modular, que ofrece un control intuitivo sobre diferentes modelos físicos y, al mismo tiempo, ayuda a salvar la brecha entre la acústica teórica y los métodos computacionales modernos. Los resultados de este trabajo proporcionan un mejor entendimiento de la inclusión de los fenómenos acústicos en la reconstrucción de campo sonoro a gran escala, lo que tiene un impacto en el audio inmersivo navegable, el diseño acústico de salas y otras áreas de la acústica.

Abstract:

With the recent advancements in acoustic and audio technology, there has been an increasing demand for thorough characterisation of the sound field properties over large spatial areas, such as entire rooms and auditoria. Sound field control, acoustic heritage preservation, room acoustic design and navigable spatial audio are among many applications that nowadays require knowing the acoustic pressure at a every point in the target domain. However, acoustic data acquisition is an experimentally challenging process, as in order to fully characterise a standard room, the number of required measurements is of the order of hundreds of millions.

This thesis addresses these challenges by developing large-scale sound field reconstruction techniques. These techniques aim to reduce the experimental efforts by predicting the sound field quantities at positions where direct measurements are unavailable. The first part of the thesis focuses on reducing the number of experimental measurements whilst maximising the reconstruction area far beyond the measurement domain. To this end, we propose a method that relies on the generalisable temporal structure of sound in rooms, achieving large-scale reconstruction of individual reflections far from the measurement arrays and preserving the statistical properties of the late reverberation across the entire reconstruction domain.

The second part of the study examines various modelling choices for sound field reconstruction, recognising that the acoustic properties of a domain can vary considerably between rooms. In this context, the thesis delves into the specific nature of the available experimental data to inform and tailor reconstruction approaches. A modular Bayesian formulation is proposed, offering intuitive control over different physical models, and simultaneously helping to bridge the gap between theoretical acoustics and modern computational methods. The results from this work provide a better understanding of the inclusion of acoustic phenomena in large-scale sound field reconstruction, having an impact in navigable immersive audio, room acoustic design and other areas of acoustics.

Sonómetros

Fuentes de ruido

Sondas de intensidad sonora

Software de cálculo de aislamientos acústicos

Sistemas de medida avanzados

Micrófonos

Analizadores de audio

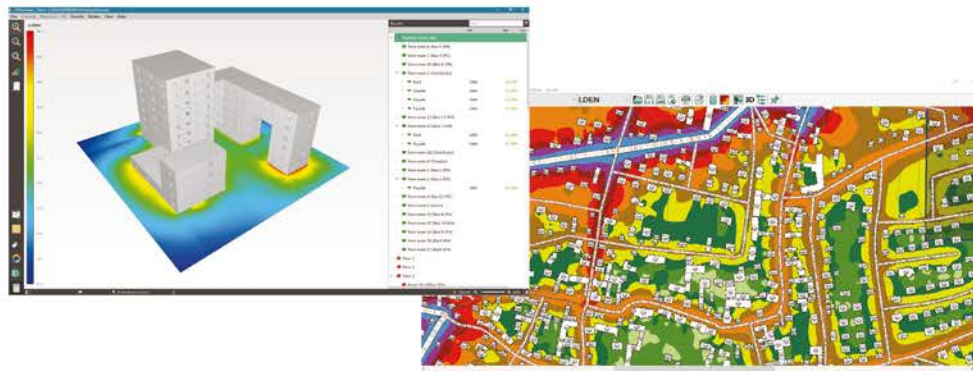
Monitorizado de ruido y vibraciones

Cámaras acústicas

Software de predicción de niveles sonoros en exteriores e interiores



SOUND OF NUMBERS



Desarrolladores y proveedores de tecnología para ingeniería acústica

 **Norsonic**

 **MICROFLOWN**
TECHNOLOGIES

MARSHALL DAY
Acoustics

 **DataKustik**

SEMEXIENGCON

GR.AS **AP**



WWW.ACOUSTICWARE.COM

La contaminación acústica marina como delito ambiental



Autores: Lucía Di Giura

Edición: Publicacions URV

Año de publicación: 2024

ISBN: 9788413651576

Síntesis

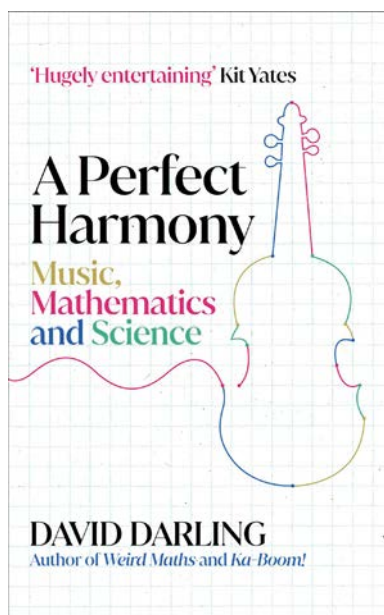
Este libro plantea un estudio sobre la contaminación acústica marina con el fin de determinar si el Derecho penal puede servir como herramienta de protección ambiental frente al ruido submarino de origen antropogénico. La investigación expone la gravedad de este tipo de contaminación y los efectos adversos que provoca en la fauna y en el ecosistema marino, al tiempo que destaca la falta de regulación y de valores límite de emisión en el ámbito administrativo como factores que dificultan su control. Con ello, se propone analizar la posibilidad de encuadrar la contaminación acústica marina dentro de los delitos ambientales y determinar si existe en el Derecho penal español algún tipo delictivo aplicable a estos casos.

Sobre los autores

Lucía di Giura es abogada por la Universidad Nacional de Rosario,

Argentina, y cuenta con un posgrado en Derecho de Infancia, Protección de la Persona y Adopción de la Universidad de Barcelona y un máster en Derecho Ambiental en la Universitat Rovira i Virgili de Tarragona. Su especialización se centra en los derechos humanos y el derecho ambiental internacional. Actualmente trabaja como pasante en la Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente (AIDA).

A Perfect Harmony: Music, Mathematics and Science



Autores: David J. Darling

Edición: Oneworld Publications

Año de publicación: 2025

ISBN: 9780861549856

Síntesis

Una odisea melódica a través de los mundos entrelazados de la música, la física y las matemáticas.

Desde las primeras civilizaciones, los seres humanos han encontrado formas de hacer música, ya sea con tambores improvisados o flautas de hueso perforadas. Pero ¿cómo es

posible que la música, que no es más que una serie de tonos y ritmos determinados, se haya convertido en una parte tan esencial de la experiencia humana?

Desentrañando los curiosos vínculos entre las notas y los números, la percepción musical, la psicología y la física, David Darling examina la fascinante ciencia que hay detrás de la música, desde sus orígenes paleolíticos hasta la actualidad.

Al revelar conexiones sorprendentes y desmontar mitos generalizados, *A perfect harmony* plantea las siguientes preguntas: ¿Por qué los músicos suelen ser mejores en matemáticas que los que no son músicos? ¿Por qué algunas piezas nos parecen tristes y otras alegres? ¿Escuchar a Mozart predispone a los bebés a ser genios? ¿Podría una IA componer la sinfonía perfecta?

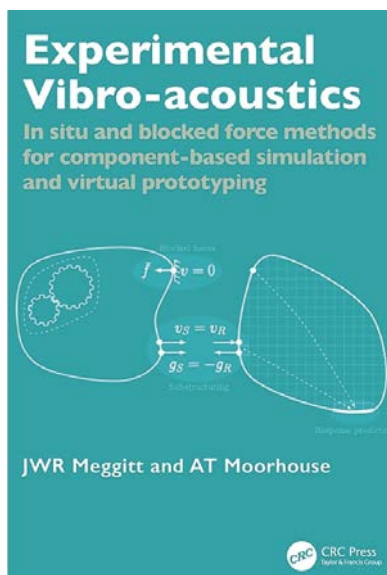
Sobre los autores

David Darling es un prolífico escritor, científico, astrónomo y músico. Estudió Física en la Universidad de Sheffield y se doctoró en Astronomía en la Universidad de Manchester. Posteriormente, se trasladó a Estados Unidos, donde trabajó como gerente de aplicaciones de software en Cray Inc.

Darling ha sido profesor, ha dado charlas en escuelas, y gestiona *The Internet Encyclopedia of Science*, un glosario científico que incluye tanto conceptos como biografías de científicos destacados.

Es autor de múltiples artículos de divulgación y de alrededor de cincuenta libros, incluido el bestseller *Equations of Eternity*. Se han traducido al castellano *El sorprendente libro de las rarezas matemáticas*, en coautoría con Agnijo Banerjee, y *Matemáticas para entender el mundo en que vivimos*, que realizó en colaboración con Juan Medina Molina.

Experimental Vibro-acoustics: In situ and blocked force methods for component-based simulation and virtual prototyping



Autores: Joshua Meggitt y Andrew Moorhouse

Edición: CRC Press

Año de publicación: 2025

ISBN: 9781032479712

Sinopsis

Experimental Vibro-acoustics es la primera guía práctica y exhaustiva de ingeniería que muestra cómo utilizar eficazmente los datos vibroacústicos medidos en un enfoque basado en componentes para el análisis, la simulación, la creación de prototipos virtuales y la implementación de la tecnología del «gemelo digital» en máquinas y sistemas mecánicos.

El libro proporciona técnicas prácticas que abarcan la medición, el procesamiento de datos y las incertidumbres, e incluye muchos «trucos del oficio». También incluye una serie de estudios de casos y un ejemplo detallado paso a paso en forma de tutorial. Además, se centra en el método de fuerza bloqueada *in situ*, que ahora es

una norma internacional, en el que se han basado muchos de los avances del enfoque basado en componentes.

Este libro es esencial para los ingenieros de diseño especializados en vibración, acústica y dinámica estructural que diagnostican y resuelven problemas vibroacústicos en máquinas y sistemas mecánicos, así como para la simulación de ensamblajes existentes y virtuales. Su ámbito de aplicación va más allá de la industria automovilística, abarcando nuevas aplicaciones en el transporte aéreo, ferroviario y marítimo, así como en equipos domésticos e industriales y edificios. Este libro es relevante tanto para investigadores como para ingenieros industriales.

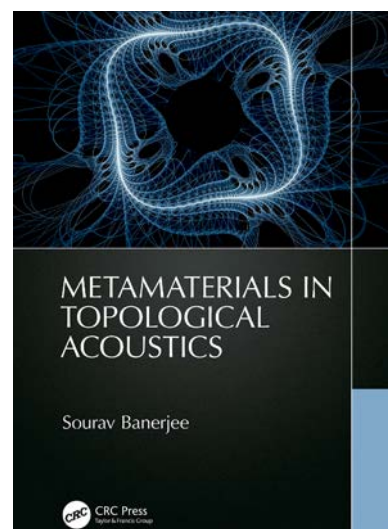
Sobre los autores

Andy Moorhouse es conocido principalmente por ser el autor principal del libro *In situ Blocked Force Method*, que es de gran importancia para el tema de este nuevo libro. Ha trabajado en el campo de la vibroacústica desde que comenzó su doctorado en 1985 y es reconocido especialmente por ser pionero en métodos de medición *in situ* en este campo.

Entre 2007 y 2021, fue profesor de Ingeniería Acústica y Vibraciones, así como director de los Laboratorios de Acústica de la Universidad de Salford y coordinador del grupo de trabajo 57 de la ISO TC43, lo que condujo a la publicación del método de fuerza bloqueada *in situ* en la norma ISO 20270 en 2019. Ha sido investigador principal de varios proyectos financiados, ha supervisado la realización de dieciséis tesis doctorales y ha elaborado numerosos informes técnicos para el Gobierno del Reino Unido. En 2018, recibió la prestigiosa medalla del Instituto de Ingeniería Acústica en reconocimiento a sus destacadas contribuciones en el campo de la ingeniería acústica. Es ingeniero colegiado y miembro del Instituto de Acústica.

Joshua Meggitt ha trabajado en el campo de las fuerzas bloqueadas, la simulación basada en componentes y el prototipado virtual desde que comenzó su doctorado en 2013. Durante este tiempo, ha contribuido al campo mediante la presentación de uno de los primeros estudios experimentales que combina fuerzas bloqueadas con subestructuración dinámica (2014), el desarrollo de un método de caracterización *in situ* para aislantes de vibraciones (2015), la formulación de un riguroso marco de incertidumbre para fuerzas bloqueadas, subestructuración y TPA (2020) y el establecimiento de una métrica para evaluar la integridad de la interfaz (2020). Joshua colabora habitualmente con la industria, ofreciendo tanto investigación por contrato como supervisión de doctorados. También imparte cursos de formación sobre métodos de fuerza bloqueada y prototipado virtual. En 2023, Josh recibió la prestigiosa medalla Tyndall del Instituto de Acústica del Reino Unido en reconocimiento a sus logros y servicios en el campo de la acústica.

Metamaterials in Topological Acoustics



Autores: Sourav Banerjee

Edición: CRC Press

Año de publicación: 2025

ISBN: 9781032126906

Sinopsis

Al igual que la investigación topológica en fotónica y física de la materia condensada, los metamateriales acústicos permiten explorar los comportamientos topológicos en fonónica y acústica programable. En este libro se aborda el análisis del comportamiento topológico de la acústica a través del diseño innovador de los metamateriales. Ofrece una valiosa perspectiva sobre los metamateriales acústicos, desde los fundamentos multidisciplinarios hasta la investigación de vanguardia.

Cubre los fundamentos de la mecánica clásica y cuántica, así como los principios más avanzados de la física de la materia condensada, para que los ingenieros puedan comprender fácilmente la acústica topológica. Expone los comportamientos topológicos en acústica y ondas elásticas a través de los efectos Hall cuánticos analógicos, los efectos Hall cuánticos de espín y los efectos Hall cuánticos de valle, así como sus aplicaciones. Explica las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de diseño y ofrece directrices para seleccionar diseños específicos de metamateriales acústicos con comportamientos topológicos concretos. Además, incluye código MATLAB® para el análisis numérico de estructuras de bandas.

Se trata de un libro dirigido a estudiantes de posgrado, investigadores, científicos y profesionales de los campos de la ingeniería de materiales, la mecánica, la ingeniería civil y la ingeniería aeroespacial, así como a quienes deseen ampliar sus conocimientos y comenzar a investigar en el campo de los metamateriales.

Sobre los autores

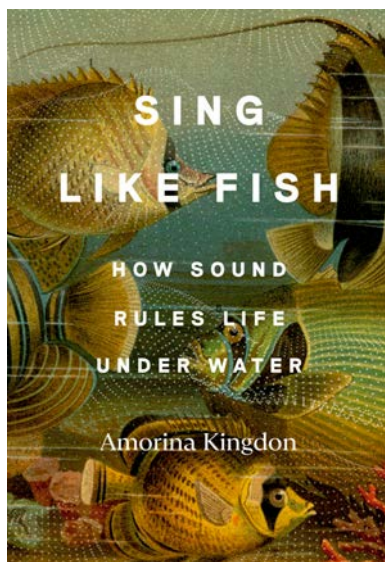
Sourav Banerjee se graduó en Ingeniería Civil en el Indian Institute of Engineering Science and Technology (IEST), y posteriormente obtuvo un

máster en Ingeniería Estructural en el Indian Institute of Technology (IIT). En 2005, completó su tesis doctoral en Ingeniería Mecánica en la Universidad de Arizona, en Tuscon (EE. UU.).

Actualmente, ejerce como profesor asociado del Departamento de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Carolina del Sur (UofSC), Columbia. Además, ostenta el cargo de director del Laboratorio Integrado de Evaluación de Materiales y Simulación Predictiva (i-MAPS) de la UofSC.

La investigación actual de Banerjee abarca áreas como la acústica computacional y los ultrasonidos, la mecatrónica de materiales multifuncionales y metamateriales, así como la acústica biomecánica, el bioorigami y la materia programable.

Sing Like Fish: How Sound Rules Life Under Water



Autores: Amorina Kingdon

Edición: Crown

Año de publicación: 2025

ISBN: 9780593442791

Sinopsis

Durante siglos, los seres humanos ignoramos los sonidos del «mundo silencioso» del océano, asumiendo que lo que no podíamos

percibir no existía. Pero no podíamos estar más equivocados. Los científicos marinos cuentan ahora con la tecnología necesaria para grabar y estudiar la compleja interacción de los innumerables sonidos del mar. Por fin podemos rastrear cómo viajan los sonidos con las corrientes, cómo se reflejan en el fondo marino y en la superficie, cómo se curvan con la temperatura e incluso con la salinidad, cómo ayudan los sonidos a la supervivencia de la vida marina y cómo el ruido humano puede transformar ecosistemas marinos enteros.

En *Sing Like Fish*, la galardonada periodista científica Amorina Kingdon sintetiza los descubrimientos históricos con las últimas investigaciones científicas para ofrecernos un retrato claro y convincente de este mundo sonoro submarino. Desde el tamborileo en la vejiga natatoria del pez guardiamarina de aleta lisa, lo suficientemente fuerte como para mantener despiertos a los habitantes de las casas flotantes, hasta la sintaxis del canto de las ballenas; desde el ensordecedor crujido de los camarones pistola hasta la resonancia sísmica de los terremotos y volcanes submarinos, el sonido desempeña un papel vital en la alimentación, el apareamiento, la crianza, la navegación y la advertencia, incluso en animales que nunca sospechamos que tuvieran capacidad acústica.

Mientras tanto, nos subimos a nuestras lanchas motoras y cruceros, ajenos al impacto que causamos bajo nuestros pies. Nuestro estilo de vida depende del petróleo que transportan los rugientes petroleros y de los productos que viajan en enormes buques portacontenedores. Nuestros mares resuenan con sonidos creados por el ser humano, pero apenas estamos empezando a comprender las repercusiones del ruido antropogénico en los delicados ecosistemas acústicos del mundo marino: enmascara las llamadas de apareamiento, ahuyenta a los ani-

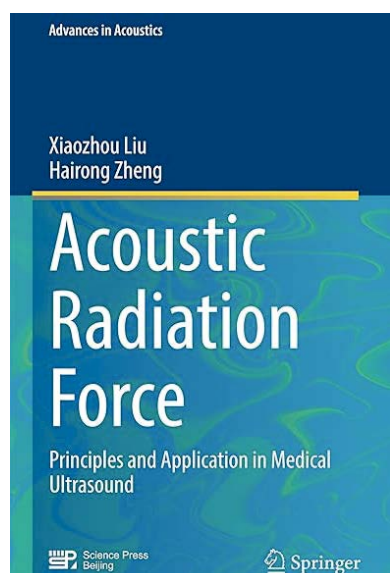
males de sus fuentes de alimento e incluso hiere a las criaturas, desde el plancton hasta las langostas.

Con una prosa íntima y artística, *Sing Like Fish* cuenta una historia única y completa sobre los sonidos sumergidos de los animales marinos, imagina un futuro más tranquilo y ofrece una nueva y profunda comprensión del mundo bajo la superficie.

Sobre los autores

Amorina Kingdon es una escritora científica cuyo trabajo ha sido antologado en Best Canadian Essays y que ha recibido distinciones como el Premio de Publicación Digital, el Premio Jack Webster y el Premio al Mejor Escritor Novel de Revistas de los Premios Nacionales de Revistas. Anteriormente, fue redactora de la revista Hakai Magazine y escritora científica de la Universidad de Victoria y del Science Media Center of Canada.

Acoustic Radiation Force: Principles and Application in Medical Ultrasound



Autores: Xiaozhou Liu y Hairong Zheng

Edición: Springer Verlag

Año de publicación: 2025

ISBN: 9789819531516

Sinopsis

Este libro ofrece una visión general completa de la fuerza de radiación acústica sobre partículas esféricas. Explora la fuerza ejercida por ondas gaussianas viajeras y ultrasonidos enfocados esféricamente mediante el método de acústica de rayos. También analiza la fuerza generada por ondas planas y ondas gaussianas viajeras mediante el método de dispersión acústica. Asimismo, examina los efectos de las ondas estacionarias gaussianas y de las partículas esféricas multicapa. Además de estos temas centrales, el libro aborda la fuerza de radiación acústica de otras fuentes de sonido. Entre ellas se encuentran los haces producidos por transductores enfocados huecos y transductores de pistón anular, así como los haces gaussianos cuasi-Bessel de orden cero y los haces Airy-Gauss. También explica cómo los límites afectan a la fuerza de radiación acústica y a las interacciones entre múltiples partículas. Por último, el libro destaca las aplicaciones médicas de la fuerza de radiación acústica. Al abordar estos diversos aspectos, el libro inspira una investigación más profunda y completa sobre el uso de la fuerza de radiación acústica para manipular partículas. El libro está dirigido a estudiantes universitarios de último curso y de posgrado en acústica, así como a investigadores y profesionales dedicados al estudio de los ultrasonidos y las imágenes médicas.

Sobre los autores

Xiaozhou Liu es profesor del Instituto de Acústica de la Universidad de Nanjing (China). También es director de la Sociedad Acústica de Jiangsu y ocupa la cátedra distinguida Pan Zhonglai en la Universidad de Nanjing.

El profesor Liu obtuvo su doctorado en Física en la Universidad de Nankín en 1999. Posteriormente, realizó una estancia de investigación

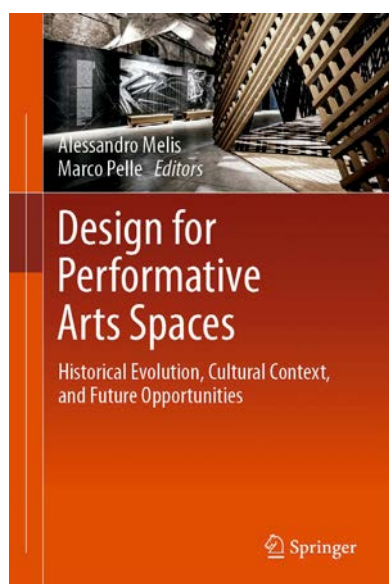
postdoctoral en la Universidad Jiao Tong de Shanghái (China) entre 1999 y 2000. En 2009 fue investigador visitante en el Instituto de Investigación de Materiales de la Universidad Estatal de Pensilvania (EE. UU.).

Sus intereses de investigación incluyen la acústica no lineal, los ultrasonidos médicos y los ensayos no destructivos por ultrasonidos. Ha dirigido varios proyectos de investigación clave, entre los que se incluyen un plan nacional de investigación y desarrollo y seis proyectos de la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China. También ha participado en cuatro importantes proyectos nacionales de investigación científica y en un proyecto clave de la Fundación Nacional de Ciencias Naturales. Su trabajo ha dado como resultado el desarrollo de un nuevo tipo de sensor ultrasónico piezoeléctrico, calificado como de nivel avanzado a escala internacional. Además, se le han concedido catorce patentes de invención nacionales. En 2022, recibió el segundo premio de los Premios al Progreso Científico y Tecnológico de la Educación Superior; en 2007, el segundo premio de los Premios de Ciencias Naturales de la Educación Superior; y en 1997, el tercer premio de los Premios al Progreso Científico y Tecnológico de la Comisión Nacional de Educación.

Hairong Zheng es académico de la Academia China de las Ciencias, profesor y vicerrector de la Universidad de Nankín (China). Su investigación se centra en la tecnología de la información, la instrumentación de imágenes médicas y la biofísica acústica y magnética. Ha recibido el Premio Nacional al Joven Científico Destacado de China, el Premio Nacional a la Invención Tecnológica y el Primer Premio Nacional al Progreso Científico y Tecnológico. Es investigador principal del programa China 973, un fondo especial para el desarrollo de instrumentos científicos de la Fundación Nacional de

Ciencias Naturales de China. Obtuvo el doctorado en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Colorado en Boulder en 2006. Posteriormente, trabajó como científico de proyectos en el Departamento de Ingeniería Biomédica de la Universidad de California en Davis y como profesor y vicedecano del Instituto de Tecnología Avanzada de Shenzhen de la Academia China de las Ciencias. Actualmente, también dirige el Centro Nacional de Innovación para Dispositivos Médicos Avanzados y el Laboratorio Clave de Ciencia y Tecnología de Imagen Médica de la Academia China de Ciencias.

Design for Performative Arts Spaces: Historical Evolution, Cultural Context, and Future Opportunities



Autores: Alessandro Melis y Marco Pelle

Edición: Springer Nature

Año de publicación: 2025

ISBN: 9783031982156

Sinopsis

Este completo libro explora el multifacético mundo de los espacios dedicados a las artes escénicas.

La primera parte sienta unas bases sólidas al trazar la evolución histórica de estos espacios, mostrar ejemplos emblemáticos y destacar la importancia de la colaboración multidisciplinar en diversos contextos culturales. También examina la relación entre la danza, el movimiento y la encarnación en los espacios escénicos y destaca su poder transformador en tiempos de desafíos globales.

La segunda parte lleva a los lectores en un viaje hacia el futuro, explorando el potencial transformador de las tecnologías de vanguardia. Los capítulos de esta sección tratan sobre la interacción entre las artes digitales y la arquitectura, la integración de tecnologías inmersivas, los entornos adaptativos, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, la robótica y la fabricación digital. Se explora su capacidad para mejorar la experiencia del público, optimizar los espacios escénicos y ampliar los límites de la creatividad.

La tercera parte aborda la importante necesidad de recursos integrales en diseño de interiores, artes digitales, artes escénicas y tecnologías disruptivas. Ofrece información valiosa para estudiantes y profesionales, y abarca principios esenciales de diseño, estudios de casos de lugares destacados y el papel que desempeñan los espacios de artes escénicas en la promoción de la sostenibilidad en medio de las crisis mundiales.

En general, este libro ofrece una visión holística de los aspectos más importantes de los espacios dedicados a las artes escénicas, combinando el contexto histórico, el diseño arquitectónico, los avances tecnológicos y las perspectivas educativas. Es un recurso esencial para cualquier persona interesada en la interacción dinámica entre la arquitectura, el diseño y las artes escénicas.

Sobre los autores

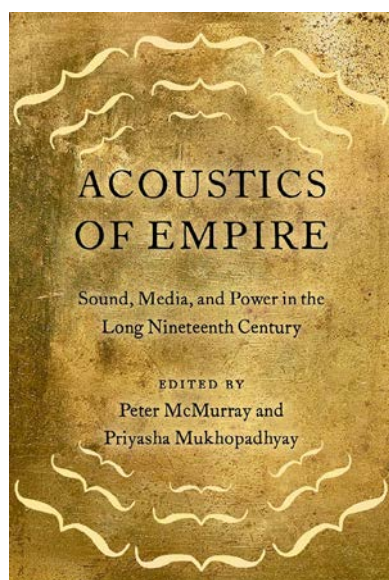
Alessandro Melis, arquitecto, artista y curador, ostenta el distin-

guido cargo de primer catedrático subvencionado en el Instituto Tecnológico de Nueva York. En 2021, el Ministerio de Cultura Italiano lo nombró comisario del Pabellón Italiano en La Biennale di Venezia. Desde 2020, también es Embajador del Diseño Italiano para el Ministerio de Asuntos Exteriores de Italia. Melis ha realizado importantes contribuciones a la investigación, como lo demuestran sus más de doscientas publicaciones, las numerosas citas en revistas de prestigio y las conferencias magistrales que ha impartido en instituciones de renombre, como la Universidad de Cambridge, el MoMA de Nueva York, la Academia de Arte de China, los Institutos Italianos de Cultura de Londres y Nueva York, la Agencia Italiana de Comercio y TEDx. Es director fundador de Heliopolis 21, un estudio de arquitectura internacional con oficinas en Italia, el Reino Unido, Estados Unidos, Alemania y México. Entre sus proyectos más destacados se encuentran el hospital Stella Maris, el único centro de Italia dedicado exclusivamente a niños con autismo, y la construcción en curso de la Feria de Trentino. Sus diseños para el Polo della Memoria SM1938, un centro universitario situado en el Memorial de la Shoá de Pisa, y para la Biblioteca Municipal de Peccioli han sido reconocidos por el Ministerio de Cultura como algunos de los ejemplos más significativos de la arquitectura italiana posterior a 1945.

Marco Pelle es un coreógrafo de renombre internacional y artista residente del New York Theatre Ballet. Ha presentado sus coreografías en algunos de los escenarios más prestigiosos del mundo, como el Centro Nacional de Artes Escénicas de Pekín y el emblemático Museo Guggenheim de Nueva York. En Estados Unidos, es reconocido por ser uno de los coreógrafos de *Pose*, la innovadora serie de Ryan Murphy nominada a los Globos de Oro. En Italia es muy conocido por *Passage*, el emblemático cortometraje dirigido por Fabrizio Fe-

rri y protagonizado por Roberto Bolle y Polina Semionova, que inauguró el 70º Festival de Cine de Venecia. Desde 2017, es miembro de la Universidad Bocconi de Milán, donde imparte clases de Gestión de las Artes Escénicas y fundó GuiDance, un programa de danza inclusivo. En 2023, se convirtió en el primer bailarín y coreógrafo nombrado Accademico Olimpico desde la fundación de la Accademia Olimpica en 1555.

Acoustics of Empire: Sound, Media, and Power in the Long Nineteenth Century



Editores: Peter McMurray y Priyasha Mukhopadhyay

Edición: Oxford University Press

Año de publicación: 2024

ISBN: 9780197553787

Sinopsis

Acoustics of Empire articula lo que podríamos llamar una historia cultural de la acústica global en la era del Imperio. En los últimos años, los estudios sobre música y sonido han puesto su atención en cuestiones relacionadas con el Imperio y el pensamiento poscolonial, planteando nuevas preguntas sobre

las formas y la circulación del poder cultural, tecnológico y militar, tal y como se manifiesta a través del sonido. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se han centrado en el siglo XX. Por el contrario, los estudios sobre el sonido y los medios de comunicación han convertido la historia de la ciencia y la tecnología del siglo XIX en una parte central de su repertorio canónico, pero han pasado por alto en gran medida las formas en que estos avances tecnológicos surgieron de contextos imperiales. Al examinar las historias del sonido, las prácticas de escucha y las tecnologías audiovisuales a lo largo del siglo XIX a través de la lente del poder geopolítico, *Acoustics of Empire* rescata una historia del sonido vinculada a cuestiones de dominio imperial y colonial, incluso cuando las elude. Al reunir contribuciones de historiadores, musicólogos, antropólogos y críticos literarios, el libro destaca el momento histórico en el que las disciplinas académicas de la musicología y la historia se crearon simultáneamente y a menudo en relación con los imperios globales.

Sobre los editores

Peter McMurray es musicólogo, saxofonista y artista multimedia. Su investigación se centra en la intersección entre el islam y el sonido, especialmente en el Imperio otomano y Turquía, y abarca la recitación, la liturgia, la teología y la arquitectura. Otros intereses de investigación son la historia global de la teoría musical, la historia de los medios audiovisuales (especialmente los medios de audio magnéticos entre 1890 y 1945) y las intersecciones entre raza y escucha.

Durante más de diez años trabajó como conservador adjunto de la Colección Milman Parry de Literatura Oral y actualmente sigue investigando sobre poesía oral, historia y teoría de la oralidad y la voz. Como intérprete, tiene interés por el jazz y la improvisación experimental. Tam-

bién ha formado parte del metaLAB y de la revista *Sensate Journal* de la Universidad de Harvard.

Ha completado un doctorado en Música en Harvard, con especialización secundaria en Práctica Crítica de los Medios de Comunicación. También tiene títulos de composición musical (MFA, Brandeis) y de Literatura Clásica (Griega y Eslava, BA, Harvard). Tras finalizar su doctorado, obtuvo becas posdoctorales en el MIT (Mellon) y en la Society of Fellows de Harvard.

Actualmente es miembro y director de estudios de Música en el Queens' College. De 2022 a 2027 dirigirá el proyecto de investigación «*Ottoman Auralities and the Eastern Mediterranean: Sound, Media and Power, 1789-1922*».

Priyasha Mukhopadhyay es profesora ayudante doctor de inglés en la Universidad de Yale y anteriormente fue becaria júnior en la Harvard Society of Fellows. Su trabajo de investigación se centra en la historia literaria del mundo colonial, principalmente en el sur de Asia a finales del siglo XIX y principios del XX. Gran parte de su investigación explora las prácticas de lectura de este periodo, centrándose en situaciones que desafían nuestras nociones sobre lo que significa leer y quién es un lector.

Sus investigaciones han aparecido en las revistas *Journal of Commonwealth Literature* y *Journal of Victorian Culture*, así como en el volumen colectivo *Fighting Words: Fifteen Books that Shaped the Post-colonial World*. También es coeditora de *The Global Histories of Books: Methods and Practices*, una recopilación de ensayos que exploran cómo los libros traspasan las fronteras nacionales y lingüísticas. Su libro *Required Reading: The Life of Everyday Texts in the British Empire* (Princeton University Press, 2024) ha recibido el Premio Internacional del Libro Gaddis Smith 2025.

El futuro es un mundo apasionante. Hagámoslo seguro.

Especialistas en tecnología y protección submarina.



saes®

Innovar_Desarrollar_Proteger

TRACK-NOISE

ACÚSTICA - AUDIO - RUIDO - VIBRACIONES
SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN SONORA 2D & 3D

Treble: la nueva generación de software de simulación acústica con motor híbrido de cálculo

Treble ofrece un nuevo enfoque en la simulación acústica 3D a través de su innovadora plataforma nativa en la nube. Combinando velocidad, precisión y facilidad de uso, Treble permite a sus usuarios diseñar y optimizar entornos acústicos utilizando las **teorías ondulatoria y geométrica**, obteniendo resultados de forma rápida y fácil de interpretar.

Entre sus características fundamentales se pueden destacar:

- **Precisión realista:** El motor híbrido de acústica ondulatoria y geométrica de Treble ofrece una precisión superior, sobre todo en baja frecuencia, validada en diversos estudios exhaustivos.
- **Flujo de trabajo optimizado:** Importación automática de archivos Revit a través de la función de importación ifc con procesos acelerados.
- **Plataforma nativa en la nube:** Sin necesidad de VPN ni escritorio remoto. Ejecuta múltiples simulaciones en paralelo y accede a ellas desde cualquier navegador sin necesidad de hardware especializado.
- **Colaboración en tiempo real:** Trabajo en equipo al estilo «Google Docs» con activos compartidos, actualizaciones instantáneas y simulaciones paralelas ilimitadas.
- **Auralización inmersiva:** Crea experiencias audiovisuales auténticas y realistas en segundos y compártelas fácil-

mente con clientes y compañeros a través de enlaces web.

- **Escalabilidad y seguridad:** Gestiona proyectos de cualquier tamaño con cifrado de primer nivel y protección de datos certificada (SOC2).

Puede probar la aplicación web de Treble (*Treble Web Application*) de forma gratuita a través de este enlace: <https://www.treble.tech/treble-tracknoise>



Nueva actualización en Sound Insulation Reporter de NTi-Audio

El nuevo modo *Site View* del software de **Aislamiento Acústico** de NTi-Audio permite gestionar múltiples particiones y obtener una visión general del cumplimiento en todas ellas. Este modo es perfecto para certificaciones de edificios o campañas de medida con varios recintos. Un nuevo panel centralizado ofrece una visión completa de todas las particiones de aislamiento acústico. Además, se pueden consultar, al instante, descripciones, clasificaciones, valores objetivo e **indicadores de cumplimiento** para múltiples particiones, todo ello en una interfaz optimizada. La nueva interfaz gráfica de usuario garantiza información más rápida, resultados más claros y un control total del proyecto.

Además, se puede hacer un volcado masivo de los datos del sonómetro XL3 y personalizar la interfaz para resaltar los parámetros más importantes, así como editar las propiedades de varias particiones simultáneamente. También se han incorporado **parámetros de Objetivo, Calificación y Cumplimiento**, que pueden seleccionarse según los estándares pertinentes o configurar de manera manual. Los resultados se comparan automáticamente con este objetivo y se muestran como indicadores de cumplimiento muy visuales.

En el siguiente enlace se puede ver un video demostrativo:

<https://www.youtube.com/watch?v=HTyPYAetIAk>

Name	Standard	Type	Rating Name	Rating	Target	Compliance
Demo Test	ISO 16283	Airborne	Dist.a	51	43	
Impact Test	ISO 16283	Impact	Dist.a	58	43	
Keting Bathroom	ISO 16283	Airborne	Dist.a	18	20	
Keting Floor Airborne	ISO 16283	Airborne	Dist.a	53	43	
Keting Floor Impact	ISO 16283	Impact	Dist.a	62	64	
Keting Kitchen	ISO 16283	Airborne	Dist.a	13	20	
Keting Room1	ISO 16283	Airborne	Dist.a	26	20	
Keting Room2	ISO 16283	Airborne	Dist.a	19	20	
Keting Room3	ISO 16283	Airborne	Dist.a	23	20	
Wall Airborne	ISO 16283	Airborne	Dist.a	51	43	

SOUND OF NUMBERS

GRAS PR0003/PR0004: el futuro de los ensayos acústicos en cabinas de vehículos

Sound of Numbers presenta los nuevos *Auto Arrays* PR0003 y

PR0004 fabricados por su colaborador GRAS Sound & Vibration. Dos innovadoras herramientas que marcan un antes y un después en las mediciones acústicas dentro de las cabinas de los vehículos.



Diseñados para ofrecer precisión, repetibilidad y facilidad de uso, estos arrays de 6 micrófonos están optimizados para ensayos de rendimiento de audio en cabina, *benchmarking* acústico y análisis NVH (Noise, Vibration and Harshness).

Existen dos configuraciones posibles:

- **PR0003-Cross Config:** basada en metodologías de referencia utilizadas por fabricantes líderes como Harman.
- **PR0004-AES Config:** conforme a las recomendaciones del comité AES TC-AA para mediciones acústicas en cabina.

Entre otras ventajas, estos sistemas ofrecen una representación espacial precisa de la posición del oyente, montaje rápido y sencillo, resultados fiables y repetibles y conexión por un solo cable garantizando una instalación limpia y sin complicaciones.

Nuevo módulo Bluetooth 5 LE para analizadores Audio Precision

Sound of Numbers acaba de presentar el nuevo **módulo Bluetooth 5** para la familia de analizadores **APx B-Series** de Audio Precision. Un avance clave para todos los fa-

bricantes de auriculares, audífonos, altavoces y sistemas de automoción que ya trabajan con **LE Audio**, **LC3**, **Unicast** y **Auracast**.



Este nuevo módulo introduce una plataforma de ensayo totalmente integrada para la nueva generación de dispositivos Bluetooth 5, aportando una alternativa profesional frente a soluciones basadas en placas de desarrollo o *smartphones*, que no ofrecen calibración, automatización ni fiabilidad en entornos de laboratorio o producción.



¿Qué aporta el nuevo módulo BT5 de Audio Precision?

- Compatibilidad total con LE Audio, incluyendo el códec LC3, Unicast Music/Voice y Auracast.
- Descubrimiento, emparejamiento y conexión nativos con dispositivos Bluetooth 5 desde el propio analizador.
- Transmisión de audio Unicast hacia el DUT y recepción de voz desde el micrófono de un auricular o audífono.
- Emisión Auracast con función *broadcast assist*, sin necesidad de móvil ni intermediarios.
- Integración con el software APx500 v9.2 o superior y con todo el ecosistema de medición acústica de AP.

Colaboración con TIRA GmbH, desarrollador de Sistemas de Ensayo de Vibraciones

Sound of Numbers amplía su oferta en instrumentación con los Sistemas de Ensayo de Vibraciones de TIRA GmbH.

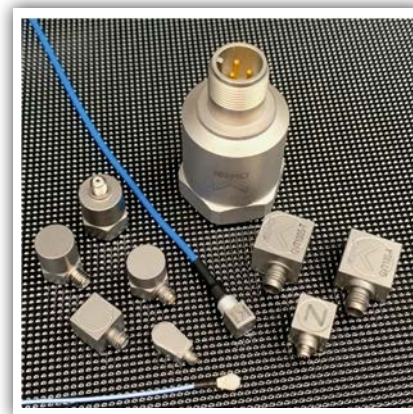
Estos sistemas, formados por excitadores (*shakers*) y amplificadores de potencia, permiten reproducir con precisión condiciones de vibración en laboratorio para aplicaciones de I+D, control de calidad y ensayos ambientales.



Gracias a esta colaboración, Sound of Numbers puede ofrecer soluciones completas para la generación y control de vibraciones, integrables con equipos de medida y análisis acústico o estructural.

Kemo Ltd: fiabilidad y precisión de acelerómetros y accesorios de medición

Sound of Numbers ha consolidado su colaboración con Kemo Ltd., fabricante británico especializado en filtrado analógico, acondicionamiento de señal y sensores piezoeléctricos para aplicaciones acústicas y de vibración.



Kemo, con más de 50 años de trayectoria, aporta soluciones de alta precisión como filtros *low-pass*, *high-pass* y *notch*, amplificadores IEPE, acelerómetros y cables de baja contaminación, utilizados en laboratorios, universidades e industria. Esta alianza permite ofrecer a sus clientes cadenas de medición más estables, con menor ruido y mayor integridad de señal.

La colaboración incluye soporte técnico especializado, selección de soluciones a medida y suministro integrado para proyectos de investigación.



Sonec Acoustic, membrana acústica proyectada

Sonec Acoustic es una solución innovadora desarrollada para garantizar el aislamiento acústico y térmico en la edificación de manera eficiente y sostenible.

Desde hace más de dos décadas, Desarrollos Químicos para la Construcción (DQC) se dedica al desarrollo, fabricación y comercialización de las últimas tecnologías en el campo de los productos químicos especializados en la construcción, entre ellos: Sonec Acoustic.

Sonec Acoustic se caracteriza por:

- Mejorar el aislamiento acústico reduciendo el ruido hasta en 5dB, lo que fomenta una mejora de la calidad de vida de las personas.
- Mejorar el aislamiento térmico, contribuyendo a la eficiencia energética.

- Estar fabricada con resinas acrílicas en base acuosa por lo que no es perjudicial para la salud, no produce olores molestos y su contacto no afecta a la piel.
- Ser una membrana continua y elástica, de espesor mínimo, que evita fisuras y grietas, al absorber las dilataciones y contracciones de los soportes.
- Aplicarse de forma rápida y eficaz, en una sola capa y sin tratamiento de juntas.
- Disponer de una reacción superior al fuego (Bs2d0).

Además, cabe destacar, que es muy versátil ya que es compatible con cualquier sistema constructivo, se aplica sobre superficies verticales y horizontales, proporcionando un aislamiento superior sin alterar el diseño arquitectónico.

Invertir en Sonec no es solo invertir en acústica: es cuidar tu proyecto y a las personas que lo habitan.



Nuevo modelo del limitador CAP21 PRO

En dBelectronics han lanzado dos nuevos modelos de limitador sonoro: *CAP21 Advanced Pro* y *CAP21 Basic Pro*. Estos nuevos modelos permiten dar un salto tecnológico respecto al mercado actual, añadiendo nuevas funcionalidades que mejoran el rendimiento y ofrecen

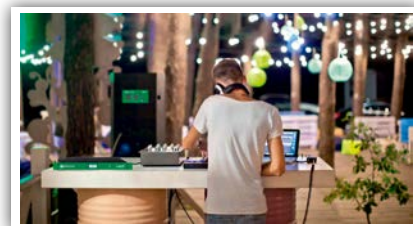
una mayor versatilidad e implementando **nuevos algoritmos** que realizan una limitación más inteligente y adaptativa. Estos algoritmos son más avanzados y rápidos y permiten, por ejemplo, activar la función *Mic-Guard*, que permite controlar el volumen de una manera más eficiente, o el modo *MPLive*, que implementa un algoritmo específico para los directos musicales y conciertos.

Estos nuevos modelos ofrecen también la posibilidad de conectar un **sensor de puerta o ventana**, para poder controlar el volumen de emisión según la apertura y cierre de estos elementos, acorde a la normativa vigente.

La conectividad de los limitadores con la plataforma IoT **Synkro Cloud** permite a los usuarios visualizar y analizar los datos en tiempo real desde cualquier ubicación y mediante cualquier dispositivo. Además, permite la descarga de la memoria, para su posterior análisis *offline* y generación de informes.

Conjuntamente a los nuevos modelos, se ha desarrollado **Visual dB**, un software de visualización de los niveles de los limitadores de sonido CAP21, vía LAN, que permite la monitorización espectral instantánea en tiempo real, y desde cualquier parte del mundo. Este software permite disponer de infinitas pantallas simultáneas de forma inalámbrica, en cualquiera de sus dispositivos inteligentes.

Además, siguiendo la filosofía de mejora continua de dBelectronics, siguen en constante desarrollo y progreso, para **dar el mejor servicio a sus clientes**, y siempre atentos a lo que el mercado demanda.



CESVA

Nueva versión de firmware 3.21 para el limitador acústico LF010

Llega la nueva versión de Firmware v3.21 para el limitador acústico LF010: nuevo procedimiento de instalación y prestaciones avanzadas para el control de ruido de actividades

La nueva versión de *firmware* **v3.21** para el limitador-registrador acústico **LF010** incorpora nuevas prestaciones técnicas y establece un **nuevo procedimiento de instalación** diseñado para facilitar la instalación del limitador en diferentes tipos de actividades con música amplificada desde **bares musicales y salas de conciertos** hasta **gimnasios, hoteles y tiendas especializadas**.

La versión v3.21 es el resultado de la estrategia de CESVA para facilitar el proceso de instalación, ajuste, programación y calibración del limitador LF010.

Mejoras centradas en el instalador

1. **Nuevo procedimiento de instalación:** el limitador permite desde su conexión inicial la reproducción musical, de tal forma que es mucho más sencillo detectar y solucionar errores de conexionado del limitador. Esta limitación inicial se realiza sin utilizar la función ENOS. Una vez el limitador ha sido calibrado la opción ENOS queda activada, además nuevas opciones de funcionamiento estarán disponibles especialmente para conciertos en directo. La función ENOS ha sido mejorada presentando un funcionamiento más orgánico en presencia

constante de ruidos ajenos a la música.

2. **Prestaciones técnicas avanzadas (v3.21):** las mejoras cubren distintos aspectos como mensajes de aviso para una mejor instalación o la posibilidad de activar el ecualizador por un umbral de atenuación programable. También ahora es posible activar la opción **TEST MUTE** desde el propio *webserver* o la consulta de la atenuación fija aplicada por el limitador con la opción de ajuste automático del rango dinámico.



CESVA presenta el nuevo sensor de ruido espectral con opción de audio TA150

CESVA instruments presenta el nuevo **sensor de ruido espectral TA150**, una innovación diseñada para ofrecer una medición de ruido ambiental continua, precisa y versátil, ideal para ciudades inteligentes, industrias y proyectos de monitorización a gran escala.

El TA150 se posiciona como una herramienta clave para la gestión del ruido gracias a sus avanzadas características:

- **Medición ininterrumpida:** el sensor opera 24/7, capturando simultáneamente el nivel equivalente de ruido con ponderaciones de frecuencia (A, C, Z) y tiempo (F, S, I), además de niveles máximos y de pico. También ofrece análisis en bandas de 1/3 de octava para un diagnóstico más detallado.
- **Alta Precisión:** con una precisión de **Clase 1 según IEC 61672-1**, garantiza resultados

fiables y conformes a los estándares internacionales.

- **Conectividad total:** el TA150 se integra fácilmente en cualquier red gracias a sus opciones de comunicación por **Ethernet y Wi-Fi**, con la posibilidad de incorporar un módem 4G para una conectividad global y geolocalización.
- **Versatilidad de alimentación:** se adapta a cualquier entorno con múltiples opciones de alimentación, incluyendo red eléctrica, PoE (*Power-over-Ethernet*), paneles solares, baterías externas y red de alumbrado público, lo que facilita su despliegue en zonas remotas o sin infraestructura.
- **Integración IoT:** diseñado como un dispositivo 100% integrable, el TA150 puede conectarse a diversas plataformas, facilitando la creación de sistemas de monitorización conectados.
- **Servidor web integrado:** permite configurar el sensor de forma sencilla, ofreciendo acceso inmediato a la información.

Además de sus capacidades técnicas, el TA150 cuenta con una **pantalla mini OLED** que muestra en tiempo real los niveles sonoros y el estado del dispositivo, permitiendo una rápida verificación con un calibrador acústico. Su diseño robusto incluye un kit para protección contra agentes externos, garantizando



su durabilidad y un mantenimiento anual mínimo. El sensor también permite la grabación de **archivos de audio** (mp3, FLAC, WAV) de forma automatizada.

El sensor TA150 ya está disponible para pedidos. Para más información, visite www.cesva.com o contacte con CESVA vía correo electrónico a info@cesva.com

Nueva versión de NoisePlatform: la plataforma smart para la monitorización de ruido con sensores TA120 y TA150

CESVA ha presentado la nueva versión de su plataforma online para la monitorización de ruido, **NoisePlatform**, que evoluciona para ofrecer una solución más potente, detallada y con capacidades de Inteligencia Artificial (IA).

Esta actualización redefine la gestión del ruido al integrar un nuevo equipo de medición (**TA150**) y optimizar la experiencia de usuario, facilitando la toma de decisiones y el análisis técnico.

Entre algunas de las novedades más importantes, encontramos:

1. **Tagging automático con IA:** la plataforma incorpora algoritmos de Inteligencia Artificial que realizan el **tagging auto-**

mático de eventos en los audios. Esto permite **reconocer y categorizar instantáneamente** las diferentes fuentes de ruido (motos, obras, perros, etc.).

2. **Mayor detalle y claridad de datos:** la información se presenta de forma más estructurada en cuadros de mando, tableros y calendarios con **visualizaciones dinámicas e intuitivas** para comprender mejor el impacto del ruido y en mayor cantidad, con hasta **12 funciones acústicas, espectro en 1/3 de octava y audio**.

3. **Nuevo diseño responsive y cálculos por tarjetas:** Se ha rediseñado la interfaz para ofrecer un entorno 100% **responsive** y poder trabajar desde un **smartphone o tableta**. Aunque la cantidad de datos manejada es 20 veces mayor, NoisePlatform sigue ofreciendo una **experiencia de usuario práctica y sencilla** gracias al **diseño por tarjetas** que permite mostrar los cálculos y la información necesaria y adecuada en cada proyecto.

Con esta evolución, CESVA transforma NoisePlatform en una herramienta esencial para la monitorización de proyectos y planes de acción que

requieren un análisis acústico riguroso y la toma de decisiones estratégicas basada en datos fiables.



Bedrock AM100

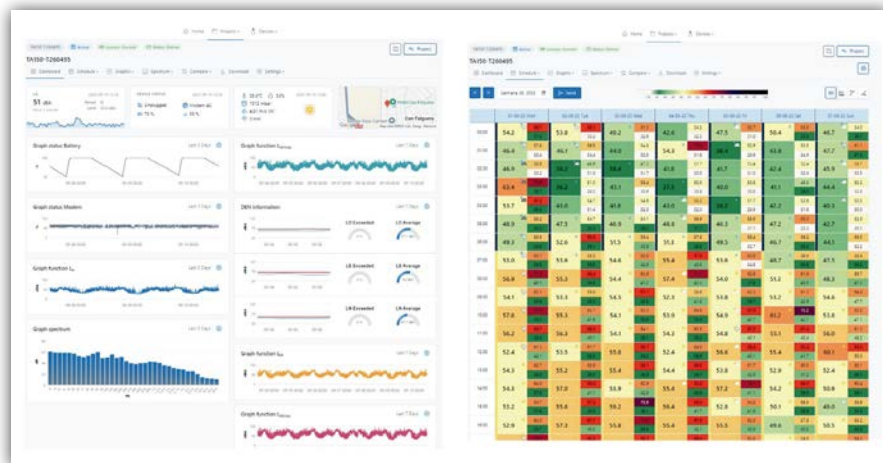
Desde IAG – Ingeniería Acústica García-Calderón S.L., distribuidor autorizado en España de Bedrock Audio, se presenta el sonómetro analizador de audio AM100 con prestaciones avanzadas para ingeniería y formación en acústica.

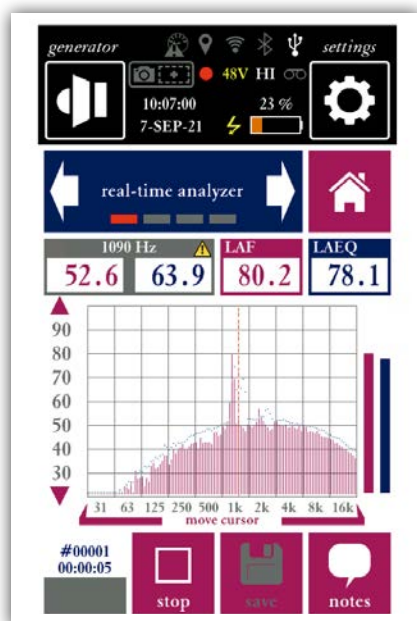


Se trata de un nuevo instrumento de medición acústica de Clase 1, cumpliendo las normas internacionales más exigentes (IEC616721:2014, IEC61260:2014, ANSI S1.4, IEC6026816 rev. 4/5).

El AM100 se posiciona como la solución integral, **a un precio imbatible**, para profesionales de ingeniería acústica en edificación, medio ambiente, audio profesional y para profesores universitarios dedicados a la docencia y la investigación en acústica aplicada.

Incorpora una pantalla táctil de 4", textos en castellano, almacenamiento interno de 32 GB, conectividad WiFi y Bluetooth 5.0, lo que permite control remoto, clonación de pantalla y transferencia de datos sin necesidad de software externo. Integra un generador de señal, barridos senoidales, ruido rosa o blanco, facilitando, entre otras, la realización de ensayos de inteligibilidad (STI/STIPA).





El dispositivo incluye todos los módulos de medición:

- Sonómetro clase 1 con ponderaciones A/C/Z y tiempos Fast/Slow/Impulso. Registro de niveles en el dominio del tiempo (monitor con multiespectro + registro de audio) y ruido en puestos de trabajo.
- Analizador en tiempo real (RTA) hasta 1/12 de octava, conforme IEC612601:2014. Espectrogramas.
- Medición de inteligibilidad del habla (STIPA y STI completo, cinco normas).
- Tiempo de reverberación (RT60) y parámetros derivados (C50, C80, D50, Ts).
- Cálculo en propio equipo del aislamiento: R, R', DnT, L'nT..
- Analizador FFT, osciloscopio digital, voltímetro AC, THD+N, polaridad altavoces.

Todas las funciones se actualizan mediante *firmware* gratuito, garantizando que el usuario disponga siempre de la última versión sin costes adicionales.

Para más información no deje de consultar o contactar con **IAG - Ingeniería Acústica García-Calderón** en:

<https://garcia-calderon.com/productos/sonometros>
info@garcia-calderon.com
Tel. 91 128 89 47

ACOEM 01dB Fusion

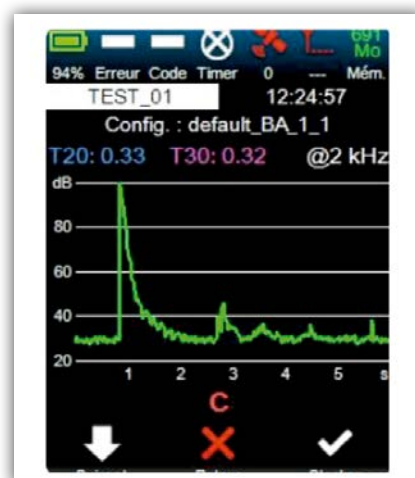
Desde **IAG – Ingeniería Acústica García-Calderón S.L.**, distribuidor autorizado en España de la firma **ACOEM 01dB**, se les presenta el **sonómetro-analizador-monitor FUSION**, el equipo más completo, potente y conectado del mercado. Es una solución «**TODO EN UNO**» para **ruido ambiental, acústica arquitectónica y vibraciones**, diseñado para maximizar la sencillez de manejo en mediciones avanzadas tanto manuales como en monitorización desatendida.

El **FUSION** es un equipo **Clase 1**, homologado para **metrología legal en España (Orden ICT/155/2020)**, en castellano, con calibración CIC, almacenamiento de multiespectros desde 20 ms, registro de audio con *trigger*, conectividad completa (Wi-Fi, LAN, 4G, GPS) y funciones de envío automático de datos a un servidor o avisos SMS, configuración remota, etc. Su memoria interna de 32 GB y su autonomía de hasta 20 horas lo convierten en un instrumento robusto para campañas prolongadas (en exterior con el uso del kit de intemperie) y medidas puntuales conforme a cualquier legislación (ISO 1996, RD1367/2007, leyes autonómicas u ordenanzas).



Con la opción **BUILDING**, FUSION se transforma en un analizador

avanzado para **ensayos de acústica de edificios**, según UNE-EN ISO 16283 y UNE-EN ISO 3382, incorporando el reconocimiento automático del recinto de medida (L1, L2, B2, T2) y ofreciendo resultados de aislamiento **in situ**, en la pantalla del instrumento, sin necesidad de PC. Mide índices de acústica de salas: C50, C80, D50, etc.



Además, con el kit **VIBRATION**, FUSION registra de forma inalámbrica las vibraciones triaxiales conforme al **RD 1367/2007** y al **CTE-SE**.

Todo ello respaldado por el software profesional **dBTRAIT** para el análisis avanzado de ruido y vibraciones ambientales, y **dBINSIDE** para el cálculo de aislamiento acústico y elaboración automática de informes.

Adicionalmente, existe una **versión**, a precio muy especial, para **uso docente**, que incluye todas las opciones de software y es ideal para proyectar en un monitor la pantalla del equipo FUSION, facilitando explicaciones en grupo, prácticas de laboratorio y formación en tecnologías de ingeniería acústica.

Para más información no deje de consultar o contactar con **IAG - Ingeniería Acústica García-Calderón** en:

<https://garcia-calderon.com/productos/sonometros>
info@garcia-calderon.com
Tel. 91 128 89 47



Modelo Auditivo de Sottek integrado en ArtemiS SUITE 17

El **Modelo Auditivo de Sottek** (**Sottek Hearing Model**), desarrollado por el Prof. Dr. Roland Sottek, simula el funcionamiento del oído humano con el objetivo de analizar señales acústicas según la forma en que realmente son percibidas. En **ArtemiS SUITE 17** este modelo permite complementar las mediciones físicas tradicionales con una interpretación perceptual del sonido, pudiéndose predecir variaciones de amplitud y frecuencia apenas perceptibles, donde el procesamiento no lineal tiene un significado fundamental.

El modelo no se limita a evaluar niveles de presión sonora o espectros. Su función principal es determinar **cómo escucha el oído humano**, teniendo en cuenta fenómenos fisiológicos como el filtrado en la cóclea y el enmascaramiento auditivo. Con ello, ayuda a identificar qué componentes del sonido son perceptiblemente relevantes y cómo contribuyen a la calidad sonora. A partir de la señal filtrada y enmascarada, el modelo determina parámetros como **Loudness (sonoridad)**, **Roughness (aspereza)**, **Tonality (tonalidad)** o **Relative Approach (enfoque relativo)**, indicadores que permiten estimar la sensación subjetiva producida por el sonido. Normas como la **DIN 38455**, la **ECMA-418-2 (1ª y 2ª edición)** y la **ECMA-74 (15ª y 17ª edición)** son métodos estandarizados para caracterizar el sonido según la percepción humana, garantizando además, que los resultados sean comparables, reproducibles y útiles en aplicaciones industriales.

Evaluar y garantizar la calidad del sonido se ha convertido en una función muy importante para el diseño de productos actual, por ello, el **Modelo Auditivo de Sottek** se aplica en sectores como el automotriz, electro-movilidad, aeroespacial, electrodomésticos, industria, energético, infraestructuras urbanas y construcción, tecnología de realidad virtual, diseño de maquinaria..., en realidad, cualquiera en el que las decisiones no deban basarse exclusivamente en métricas físicas, dado que estas no siempre se correlacionan con la experiencia auditiva real.

Puede encontrar la hoja de datos en la web de Head acoustics: **ASP 103** (Code 51103)-*ArtemiS SUITE Psychoacoustics-Advanced Analysis Module*: [\[Data Sheet | ASP 103\]](#)



labV8x3-Iso II-Módulo de entrada

labV8x3-Iso II es un módulo de entrada **HEADlab** de 24 canales con protocolo de transmisión **HEADlink 2.0** para acelerómetros triaxiales. Los ocho canales triaxiales están aislados eléctricamente entre sí y también de las interfaces digitales **HEADlink**, por lo que el módulo puede utilizarse incluso en entornos con alta interferencia electromagnética para realizar mediciones estándar, análisis modales y mucho más.

Gracias a **labV8x3-Iso II**, ya no es necesario utilizar una entrada por canal (X, Y, Z) para conectar los acelerómetros triaxiales. Cada canal cuenta con un conector Microtech (1/4-28 de 4 pines), lo que permi-

te el acoplamiento directo de cada sensor. Además, esta característica reduce el cableado en un 67%, una ventaja especialmente notable cuando se emplean decenas o incluso cientos de acelerómetros triaxiales.

El protocolo de transmisión **HEADlink 2.0** permite una frecuencia de muestreo máxima de 204,8 kHz, alcanzable utilizando los controladores de segunda generación **labCTRL II.1**, **labCOMPACT12 II**, **labCOMPACT 24 II** y **labHSU**. Con controladores de primera generación, compatibles con el protocolo de transmisión **HEADlink 1.0**, se puede alcanzar una frecuencia de muestreo máxima de 102,4 kHz.

El **labV8x3-Iso II** se caracteriza por su diseño robusto y se puede conectar con otros módulos **HEADlab** gracias a la tecnología de conexión mecánica. Al igual que todos los módulos, funciona silenciosamente (sin ventilador), por lo que su aplicación está destinada a todo tipo de sectores.

Puede encontrar la hoja de datos en la página de Head acoustics: **labV8-x3-Iso II** (Code 3756) - 24-channel input module for triax accelerometers: [\[Data Sheet | labV8x3-Iso II\]](#)



Iberacústica presenta EchoDefender: la barrera acústica modulable y reutilizable

Desde Iberacústica están encantados de presentar **EchoDefender**, una solución adaptable que **actúa como barrera acústica reutilizable**



y flexible, diseñada para gestionar el ruido en entornos temporales y cambiantes. Esta solución, conformada de paneles acústicos modulares, reduce la transmisión del ruido entre diferentes áreas y favorece el aislamiento en entornos donde el control acústico es esencial.

Su diseño ligero agiliza el transporte y montaje, garantizando la **atenuación del ruido de manera inmediata**. Esto la convierte en una solución eficaz **para profesionales que necesitan un sistema de control de ruido dinámico** dependiendo de cada proyecto.

Sus **materiales, resistentes e impermeables**, aseguran un **rendimiento estable tanto en interiores como en exteriores**, incluso en condiciones ambientales exigentes. Esta combinación garantiza una larga vida útil y un rendimiento fiable en múltiples aplicaciones.

EchoDefender ofrece un alto rendimiento en diferentes entornos:

- Obras de Construcción y reformas.
- Escenarios y Festivales al aire libre.
- Instalaciones Industriales, Oil & Gas.
- Vías de Transporte y Aeropuertos.
- Instalaciones Deportivas.
- Eventos al Aire Libre y **Espacios Comerciales**.

Entre la gama de modelos EchoDefender se encuentran:

- **EchoDefender-PB1 y EchoDefender-PB2:** paneles de dimensiones estándar, personalizables con imágenes preseleccionadas y/o incorporación de logotipo.
- **EchoDefender Custom:** panel de dimensiones personalizables y con opción de incluir logotipo, diseñado para ajustarse a las especificaciones de cada proyecto.

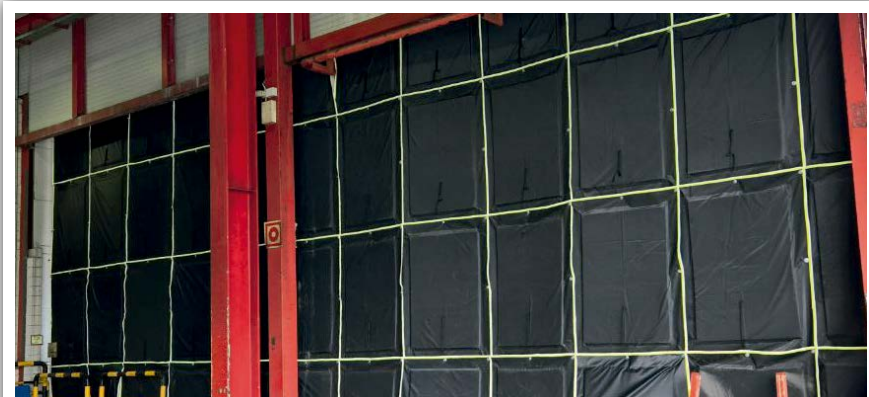
El diseño modular de EchoDefender alarga su vida útil y hace que cada intervención sea menos invasiva. Al emplear materiales resistentes, optimizar el transporte y facilitar un almacenamiento eficiente para posteriores usos, refuerza el compromiso de Iberacústica con una sostenibilidad práctica y responsable.

Para más información sobre EchoDefender, visite y contacte a través de www.echodefender.net

cdm
stravitec
Making your world a quieter place

Stravigym 2025: Elevando el Estándar de los Suelos Modulares para Gimnasios

Desde su lanzamiento en 2018, el sistema **Stravigym** ha sido un punto de inflexión para los operadores de gimnasios que buscan un rendimiento acústico flexible y de alta calidad. A lo largo de los años, Stravigym ha ofrecido soluciones modulares para toda la gama de niveles de rendimiento, siempre diseñadas para un fácil desmontaje, sin necesidad de adhesivos y con la sostenibilidad como prioridad.



En 2024, el sistema dio un gran salto adelante. Basándose en su tecnología patentada **dBooster®**, la empresa introdujo un nuevo sistema de montaje *click-fit* que elimina por completo el uso de adhesivos. Y ahora, en 2025, Stravigym está orgullosa de anunciar que incluso los sistemas acústicos más exigentes, aquellos diseñados para manejar el aislamiento de bajas frecuencias con muelles como soporte elástico, son totalmente modulares y completamente desmontables.

Nuestro nuevo elemento **sound stopper**, diseñado para proporcionar una amortiguación adicional, se integra ahora a la perfección con el muelle metálico mediante el mismo sistema intuitivo *click-fit*. Esto significa que cada solución Stravigym, desde el nivel básico hasta el sistema de muelles de máximo rendimiento, está concebida para un montaje y desmontaje sin esfuerzo.

Stravigym también lleva la modularidad un paso más allá. Al ha-

cer que cada componente sea intercambiable y reconfigurable, los operadores de gimnasios disponen ahora de una flexibilidad y adaptabilidad sin precedentes. Los suelos pueden actualizarse, las distribuciones rediseñarse y las zonas de actividad adaptarse a necesidades cambiantes, todo ello sin generar residuos innecesarios ni costes adicionales. Ya sea para incorporar nuevas actividades, cambiar el uso del espacio o responder a exigencias más estrictas de los vecinos, Stravigym evoluciona contigo. Más allá de la modularidad, el sistema actualizado mantiene una estructura ligera y de bajo perfil, lo que facilita su integración en espacios existentes sin compromisos. El nuevo muelle ha sido diseñado para ofrecer un aislamiento acústico excepcional, conservando al mismo tiempo el formato discreto y eficiente en el uso del espacio del sistema.

Con esta completa actualización, Stravigym reafirma su liderazgo en el

sector, ofreciendo a los centros deportivos de todo el mundo una **solución de suelo sostenible, adaptable y diseñada para cumplir con los estándares acústicos más exigentes**.

Puede ver un vídeo sobre el producto en:

<https://www.youtube.com/watch?v=D51R41U0Jdl&list=TLGG55UADMxkSm4xNTExMjAyNQ>

Además, puede encontrar información adicional en:

<https://cdm-stravitec.com/es/news/stravigym-2025-raising-bar-modular-gym-flooring>



Últimas publicaciones legislativas y normativas

Normas sobre acústica de AENOR

AEN-CTN 74 Acústica

UNE-EN 17823:2024/AC:2025

Propiedades acústicas de los elementos de construcción y de los edificios. Medición en laboratorio del aislamiento acústico a ruido de impactos de escaleras y elementos aislantes de escaleras.

CTN 74/SC 2 ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN

Vigente: 2025-05-21

UNE-EN ISO 5114-1:2025

Acústica. Determinación de las incertidumbres asociadas a las mediciones de la emisión sonora. Parte 1: Niveles de potencia acústica determinados a partir de las mediciones de presión acústica. (ISO 5114-1:2024).

CTN 74/SC 1 RUIDO

Vigente: 2025-06-11

UNE-CEN/TR 18180:2025

Acústica de edificios. Diccionario de datos.

CTN 74/SC 2 ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN

Vigente: 2025-10-01

UNE-CEN/TR 15226:2025

Productos de construcción. Tratamiento de la acústica en las especificaciones técnicas del producto.

CTN 74/SC 2 ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN

Vigente: 2024-11-01

Hacia Tecniacústica 2026: Granada toma el testigo



Aún con los ecos y grandes recuerdos del pasado Forum Acusticum 2025, la Sociedad Española de Acústica ha comenzado ya con los preparativos del próximo congreso Tecniacústica 2026, que se celebrará el año que viene en la ciudad de Granada.

El Congreso Ibérico de Acústica celebrará su quincuagésima séptima edición entre los días **21 y 23 de octubre de 2026**. Aunque todavía quedan pormenores por cerrar, ya se conocen algunos detalles de interés: la sede del evento será la Universidad de Granada (UGR), concretamente la **Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos**.



Precisamente para impulsar los preparativos iniciales y evaluar sobre el terreno las potenciales sedes, tanto para las sesiones técnicas como para los actos sociales, una delegación del Consejo Rector de la SEA se desplazó a Granada a finales de octubre. La comitiva, encabezada por **Antonio Pedrero** (presidente) y **Belén Casla** (tesorera), contó con el apoyo de **Jerónimo Vida**, investigador y profesor de la Universidad de Granada, quien integra el «Comité del Congreso» junto al propio Pedrero y Jorge Patrício (SPA), así como de otros dos profesores de la Universidad de Granada, Ángel Fermín Ramos Ridao y Rafael García

Quesada, que están colaborando activamente en la organización del congreso.

Durante la estancia, los representantes recorrieron diversos espacios clave para el desarrollo del evento y fueron recibidos institucionalmente en el Ayuntamiento de Granada por la alcaldesa, **Marifran Carazo Villalonga**, y por **Ana Agudo**, concejala de Movilidad, Protección Ciudadana, Agenda Urbana y Fondos Next Generation.



De cara a la planificación de los asistentes, ya se han establecido las fechas orientativas de los plazos más relevantes:

- Envío de resúmenes de comunicaciones: 15 de mayo de 2026

- Notificación de la aceptación de resúmenes: 15 de junio de 2026
- Envío de comunicaciones completas: 7 de septiembre de 2026
- Fecha límite de inscripción con comunicación: 7 de septiembre de 2026

Como en ediciones anteriores, la Sociedade Portuguesa de Acústica actuará como colaboradora en la organización del evento, colaboración que compartirá en esta edición con la ETS de Caminos, Canales y Puertos de la UGR. El congreso contará con multitud de sesiones estructuradas que abarcarán ampliamente los ámbitos de trabajo de los distintos investigadores y ponentes, cubriendo aspectos tan dispares como la acústica física, la audiolología o el procesado de señal.

Fiel al espíritu de nuestro encuentro ibérico, el congreso ofrecerá un conjunto diverso de **actividades adicionales** diseñadas para enriquecer la experiencia de los asistentes y fomentar la interacción profesional, académica y cultural. Entre ellas destacará la **Exhibición Técnica**, un espacio para aquellas empresas del sector que deseen presentar sus últimas novedades en productos, herramientas y soluciones para la medición, predicción y control del ruido y las vibraciones. Tampoco faltará, como marca la tradición, la **Cena de Gala**.

Finalmente, se dispondrá de un **programa de acompañantes** con una gran variedad de actividades gastronómicas y sociales, pensado para que quienes viajen junto a los ponentes puedan disfrutar de una experiencia completa durante su estancia en Granada.

Tecniacústica 2026, de mano de la SEA, seguirá fiel al fomento de la investigación joven, y pondrá a disposición de los ponentes me-

nos veteranos las habituales ayudas **«Bolsa de Viaje»**, para la asistencia al congreso, así como el **«Premio Andrés Lara»**, para recompensar los mejores trabajos presentados por jóvenes acústicos. El plazo máximo previsto para la solicitud para ambas ayudas es el 7 de septiembre de 2026.

Para información actualizada, inscripciones y detalles del programa, puede visitarse la web oficial del congreso: <https://www.tecniacustica.es/TECNIACUSTICA2026>

La SEA, presente en el 2º Simposio Regional de Acústica en Perú

El pasado 25 de noviembre se celebró en Lima (Perú), bajo formato híbrido, el **2º Simposio Regional de Acústica**. El encuentro, organizado por el *Instituto de Acústica y Vibroacústica del Perú* (INPAVAC), contó con una destacada participación de la Sociedad Española de Acústica.

La representación de la SEA estuvo encabezada por su presidente, **Antonio Pedrero**, acompañado por los vocales del Consejo Rector **Juan Negreira** y **Miguel Arana**, así como por la investigadora **Lara del Val**. El panel de expertos se completó, entre otros, con figuras relevantes como **Walter Alfredo Montano**, colaborador habitual de la *Revista de Acústica*, y **Jorge Patricio**, presidente de la Sociedade Portuguesa de Acústica (SPA).

En el apartado técnico, Antonio Pedrero fue el encargado de dar la bienvenida y de impartir la ponencia *«Acústica en recintos patrimoniales»*. Por su parte, Juan Negreira profundizó en la *«Importancia de las reflexiones tempranas en los recintos»*. Finalmente, Miguel Arana abordó la *«Normativa acústica en la edificación: Caso de España (CTE DB-HR)»*, mientras que Lara del Val presentó su trabajo sobre *«El uso de arrays de micrófonos para la detección y loca-*

lización espacial de insectos xilófagos en estructuras de madera».

Desde la Sociedad Española de Acústica estamos muy contentos del asentamiento oficial de este simposio regional de acústica, con su segunda celebración, y agradecemos al Comité Organizador, la invitación a participar en el evento.

Presencia española en el 2º Coloquio Internacional de Paisaje Sonoro en Morelia (México)

Entre el **20 y el 22 de octubre de 2025**, se celebró en **Morelia (México)** el **2º Coloquio Internacional de Paisaje Sonoro: Espacio Público y Ciudadanía en Centros Urbanos y Centros Históricos**. Bajo la coordinación general de **Fausto E. Rodríguez-Manzo**, profesor de la UAM Azcapotzalco, este evento reunió a diversos expertos internacionales en el área de investigación del «Paisaje Sonoro» en el **Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC)** de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

Dos miembros de la Sociedad Española de Acústica (SEA) tuvieron una presencia notable a través de dos ponencias plenarias impartidas durante el coloquio. **Jerónimo Vida Manzano**, profesor de la Universidad de Granada, inauguró el ciclo de conferencias el día 20 con la ponencia *«Integración del paisaje sonoro en el diseño urbano: de la evaluación a la intervención según la*

norma ISO12913». Posteriormente, **Laura Estévez Mauriz**, de la Universidad de León, presentó *«Planificación sonora urbana: Permeando procesos, desvelando potenciales y transfiriendo conocimiento hacia políticas urbanas»*.

Además de las sesiones académicas, el programa incluyó talleres interactivos y paseos sonoros. Destaca especialmente el **Paseo Sonoro por Morelia**, una actividad dividida en dos partes y guiada conjuntamente por **Jerónimo Vida Manzano** y **Fausto Rodríguez Manzo**, que permitió a los asistentes experimentar el paisaje sonoro del centro histórico de la ciudad.



El coloquio abordó temas cruciales como la contaminación acústica, la identidad sonora y la relación entre el sonido y el espacio público, tratando de generar un debate constructivo con relación a la investigación y la gestión del paisaje sonoro en Iberoamérica.

El profesor Jaime Ramis, miembro del consejo rector de la SEA e investigador de la Universidad de Alicante, estrena una exposición itinerante sobre acústica submarina

El pasado 4 de septiembre se inauguró en **Vilamuseu** (Villajoyosa,



Alicante), sede universitaria de la Universidad de Alicante en la localidad, la exposición titulada **«Efecto del ruido antropogénico en peces»**. El acto de presentación corrió a cargo de **Antonio Pedrero**, presidente de la Sociedad Española de Acústica (SEA).

Esta muestra nace con el objetivo de difundir los resultados de investigación de una serie de proyectos competitivos de alto nivel. En concreto, la exposición recoge los frutos de:

- El proyecto **PCI2022-135081-2**, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea a través de los fondos «NextGenerationEU»/PRTR.
- El proyecto coordinado **ACT-THUN** («Acústica y visión por Computador para estimación y monitorización no invasiva de biomasa de atún rojo y su interrelación con el paisaje sonoro»), compuesto por los subproyectos **PID2021-127426OB-C21** y **PID2021-127426OB-C22**. Ambos están financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación, la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE).

En el acto inaugural intervinieron, junto a D. Antonio Pedrero, la concejala del Ayuntamiento de Villajoyosa, **Dña. Marisa Mingot**, y **D. Jaime Ramis Soriano**, Investigador Principal del Proyecto SONORA, así como de ambos proyectos.



La exposición, que pasa a formar parte del fondo de la Universidad de Alicante, ha sido concebida con carácter itinerante para ser prestada a otras instituciones. De hecho, tras su paso por Villajoyosa, viajó en noviembre al **Campus de Gandía** de la Universitat Politècnica de València (UPV) y se prevé su presentación en **Trieste (Italia)** durante el año 2026.

La muestra consta de treinta pósteres organizados en seis bloques temáticos, diseñados para responder a tres preguntas fundamentales: **¿Qué investigamos? ¿Por qué lo hacemos? ¿Para qué?**



El hilo conductor, bajo el título «El efecto del ruido antropogénico sobre los peces», busca identificar las variables que relacionan los cambios de comportamiento en los peces con la contaminación acústica. Aunque al hablar de paisaje sonoro es habitual pensar en el Nivel de Presión Sonora (dB), la exposición destaca la relevancia de otras variables clave para el sistema auditivo de los peces, como el **Movimiento de la Partícula (PM)**.

La investigación parte de la premisa de que el ruido altera los ecosistemas y que esta agresión acústica va *in crescendo*. El objetivo final es dominar las variables que permitan proteger el medio ambiente marino y definir normativas sobre límites de emisión para barcos e instalaciones, especialmente ante el auge de la llamada «Economía Azul» (bloque 1).

Para lograrlo, la exposición detalla la metodología científica empleada: desde la comprensión del mecanis-

mo auditivo de los peces y la monitorización del medio marino (bloques 2 y 3), hasta el desarrollo de modelos matemáticos de predicción y la realización de experimentos en ambientes controlados (bloques 4, 5 y 6).

La Junta Directiva de la International Commission for Acoustics (ICA) se renueva para el periodo 2025-2028

Tras finalizar el anterior mandato de la ICA durante el presente año 2025, la ICA realizó su proceso democrático de votación para la renovación de su Junta Directiva. La nueva directiva permanecerá en el cargo desde su elección en octubre de 2025 y hasta 2028.

A continuación se presenta la lista de los miembros de la recién elegida Junta Directiva:

- Presidente: Jorge P. Arenas (SOCHA, Chile)
- Vicepresidente: Akio Ando (ASJ, Japón)
- Secretario General: Antonino Di Bella (AIA, Italia)
- Tesorero: Peter Balazs (AAA, Austria)
- Presidenta saliente: Dorte Hammershøi (DAS, Dinamarca)
- Miembros vocales: Benoît Alary (SFA, Francia), Stefan Becker (DEGA, Alemania), Michael Haberman (ASA, Estados Unidos de América), Danielle Moreau (AAS, Australia), Jorge Patrício (SPA, Portugal), Sung-Hwan Shin (KAS, Corea del Sur), Alistair Somerville (IoA, Reino Unido), Jérémie Voix (CAA-ACA, Canadá), Jerzy Wiciak (PAN, Polonia), Jun Yang (ASC, República Popular China).

Desde la Sociedad Española de Acústica queremos felicitar a los miembros electos, y desearles un fructífero y provechoso mandato.

Lima (Perú) acogerá el XIV Congreso Iberoamericano de Acústica de la FIA



Entre los días **12 y 14 de agosto de 2026** se darán cita los acústicos iberoamericanos, en **Lima (Perú)**, para celebrar una nueva edición del **Congreso Iberoamericano de Acústica, FIA 2026**. Esta edición, que será la decimocuarta del Congreso, será la primera que se lleve a cabo en el país de Perú, motivo por el cual todos los acústicos peruanos están de celebración.

La Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP), que actuará como sede del evento, se siente privilegia de tal distinción e invita a todos los acústicos a que aprovechen la ocasión para visitarla.

El congreso FIA2026 LIMA abordará los grandes desafíos actuales de la disciplina acústica en los campos del control de ruido urbano y ambiental, acústica arquitectónica, vibroacústica industrial, bioacústica, arqueoacústica, electroacústica, normativa y políticas públicas, entre muchos otros temas de interés.

En palabras del comité organizador del FIA2026, «más allá de un encuentro científico de alto nivel, FIA2026 LIMA será la oportunidad única para fortalecer redes internacionales de colaboración y disfrutar de la calidez humana, la riqueza cultural, histórica y gastronómica del Perú, donde latirá el corazón sonoro de Iberoamérica».

Con respecto a los pormenores del congreso comentan que «muy pronto se abrirá la convocatoria ofi-

cial de resúmenes a través de las redes sociales del congreso. Los invitamos cordialmente a reservar estas fechas y a formar parte de este hito para la acústica iberoamericana y promocionar este evento con su comunidad compartiendo esta información. ¡Contamos con su valiosa participación!».

A día de hoy ya se conocen algunos detalles relacionados con el cronograma de fechas de relevancia, entre las que se pueden destacar:

- Apertura del envío de Resúmenes: 30 de enero
- Fecha límite del envío de Resúmenes: 15 abril
- Notificación de aceptación: 15 mayo
- Envío de Ponencias con cuota de inscripción: 16 mayo a 30 junio
- Revisión de Ponencias por pares: 16 mayo a 31 mayo
- Fechas del Congreso: 12-14 de agosto de 2026
- Cuota de Inscripción Temprana (*Early Bird*): 30 abril al 30 junio
- Cuota de Inscripción Regular: 01 julio al 31 de julio
- Cuota de Inscripción Completa: 01 a 14 de agosto

Con respecto al comité organizador, sus miembros ya son conocidos y se encuentran trabajando para que el congreso FIA2026, en Lima (Perú) sea todo un éxito:

- Director General: Carlos Jiménez Dianderas
- Director del Comité Científico: Jorge Néstor Moreno Ruiz
- Encargado del Comité de Comunicaciones: Richard Rivera Campos
- Encargado de Finanzas: Ángel Velarde Criado

- Secretario: Celso Llimpe Quintanilla
- Comité Científico: Jorge Moreno Ruiz (Perú), Celso Llimpe Quintanilla (Perú), Richard Rivera Campos (Perú), Ángel Velarde Criado (Perú), Víctor Centa Cueva (Perú), Jorge Arenas (Chile), Jaime Ramis Soriano (España), Justo Concha Abarca (Chile), Antonio Oliveira Carvalho (Portugal), Nilda Vechiatti (Argentina), Dinara Xavier da Paixao (Brasil), Elizabeth González (Uruguay)

Desde la Sociedad Española de Acústica deseamos que los acústicos peruanos, y todos los iberoamericanos, puedan disfrutar de un magnífico y satisfactorio FIA2026. **¡Nos vemos en Lima!**

Dräger apuesta, de la mano de Audiotec, por espacios acústicamente saludables en su sede central

Dentro de su política activa para fomentar el bienestar de sus empleados y disponer de espacios de trabajo confortables y saludables, **Dräger** ha llevado a cabo recientemente un proyecto integral de aislamiento y acondicionamiento acústico de sus oficinas centrales en Madrid. Cada zona ha sido cuidadosamente tratada para reducir el ruido, y crear un ambiente de relajación que favorezca la concentración y bienestar de los empleados en su entorno de trabajo.

Para realizar estos trabajos, la compañía ha confiado en **Audiotec**, firma española especializada en **soluciones de ingeniería acústica**. El proyecto consistió en el diseño e instalación de baffles, islas y revestimientos acústicos en el *showroom* y en diferentes zonas de trabajo de las oficinas de Dräger. El objetivo era mejorar la calidad acústica de estos espacios, pero sin comprometer la estética ni la funcionalidad de estos.



Mediante el desarrollo de la **metodología Tres60°** de Audiotec, que permite analizar, diseñar, fabricar, implementar y certificar soluciones de aislamiento y acondicionamiento acústico, crean espacios denominados «**Hábitat Acústico**», que redundan positivamente en el bienestar y confort de los trabajadores. Además, actualmente, se puede valorar esta mejora mediante normas o certificaciones tales como la UNE 74201:2021, que recoge las clases y los procedimientos para la clasificación acústica de edificios, midiendo el nivel de calidad alcanzado.

En este sentido, en la recepción de Dräger cuentan ya con una placa distintiva de «**Hábitat Acústico**» que les reconoce como «**Espacio Acústicamente Saludable**». Para hacer entrega de la certificación, Ana Espinel, presidenta de Audiotec, y Marco Lora, CEO de Audiotec, acudieron al acto inaugural celebrado el pasado 4 de noviembre en las instalaciones de la multinacional en Madrid. Por parte de Dräger, recibió la placa Dionisio Martínez de Velasco, *Managing Director* de Dräger en España y Portugal. Cabe destacar la presencia de Laura González, Project Manager de Plug and Go, y Covadonga González, *Lead Partner* de Plug and Go, en-

cargadas de realizar toda la parte del diseño arquitectónico de las nuevas oficinas de la multinacional alemana.



Sound of Numbers celebra sus VI Jornadas de Tecnología para Ingeniería Acústica

El pasado 1 de octubre, Sound of Numbers celebró en Barcelona la VI edición de sus «Jornadas de Tecnología para Ingeniería Acústica». Este encuentro se ha consolidado, a lo largo de las ediciones anteriores, como un espacio de referencia para profesionales y entidades del sector.



La jornada reunió a asistentes procedentes de consultorías, universidades, laboratorios e industria, quienes participaron en un programa centrado en formación técnica y demostraciones prácticas.

Entre los contenidos destacados se incluyeron:

- curso completo del software de predicción acústica CadnaA,
- sesiones con tecnologías de GRAS, Audio Precision e IMC, orientadas a la mejora de la precisión en mediciones acústicas y electroacústicas,
- sesión de Scan&Paint 3D de Microflown Technologies, con casos prácticos de análisis y diagnóstico acústico, en colaboración con la empresa ICR, Ingeniería para el Control del Ruido,
- presentación de sistemas de medición y análisis de vibraciones de RION y SEMEX-EngCon.

Además del contenido técnico, el evento volvió a servir como un valioso punto de encuentro para el intercambio de experiencias y el *networking* entre profesionales y fabricantes.



Sound of Numbers agradece la participación de todos los asistentes, así como la colaboración de sus *partners* tecnológicos, y ya trabaja en la preparación de la VII edición, con el propósito de seguir aportando valor y formación especializada al sector acústico.

In Memoriam

El Profesor Eugeniusz Kozaczka, reputado académico polaco en acústica, falleció el 27 de mayo de 2025



Eugeniusz Kozaczka, quien fuese presidente de la Sociedad Polaca de Acústica, vicepresidente de la Sociedad Europea de Acústica y miembro de la junta directiva de la International Commission for Acoustics, entre otros cargos, falleció el día 27 de mayo de 2025. A continuación se transcribe la necrológica realizada por la Academia Polaca de Ciencia y la Sociedad Polaca de Acústica para recordar su memoria:

«Con profundo pesar les informamos que el 27 de mayo de 2025 falleció el Prof. D.Sc. Ph.D., Ing. Eugeniusz Kozaczka.

El profesor Kozaczka fue: Miembro correspondiente de la Academia Polaca de Ciencias, Presidente del Comité de Acústica de la Academia Polaca de Ciencias (2011-2020), Presidente de la Junta de la Sociedad Polaca de Acústica (2002-2011), Vicepresidente de la Junta General de la Asociación Europea de Acústica (2003-2007), Presidente del Comité Técnico de Hidroacústica de la EAA (2004-2018), Miembro de la Junta de la Comisión Internacional de Acústica (2007-2013), Empleado

de larga trayectoria de la Facultad de Ingeniería Oceánica y Construcción Naval, Universidad Tecnológica de Gdansk, y de la Facultad de Navegación y Armamento Naval, Academia Naval en Gdynia, Capitán de Navío en la Armada Polaca.

Ha fallecido un científico destacado: un hombre dotado de un carisma extraordinario, una energía inagotable y un entusiasmo contagioso. Dejó una huella indeleble en la historia del desarrollo de la acústica en Polonia: una marca de belleza, pasión y dedicación a la ciencia. No solo fue un ejemplo de sólida actitud científica, sino también el epítome de la pasión por la investigación y el compromiso con la causa. La muerte del profesor Kozaczka es una pérdida irrefutable para la ciencia polaca y, en particular, para toda la comunidad de acústicos. Permanecerá en nuestra memoria como una autoridad, mentor e inspiración para las generaciones futuras.

¡Lo mantendremos en nuestra memoria!

Comité de Acústica de la Academia Polaca de Ciencias y, la Sociedad Polaca de Acústica»

In Memoriam

D. Joaquín Pérez-Tinao Gómez-Salazar, histórico colaborador de la SEA, falleció el día 29 de septiembre de 2025



A finales del mes de septiembre, la Sociedad Española de Acústica recibía la triste noticia de la defunción de uno de sus históricos colaboradores en lo relativo a los medios audiovisuales. Para recordarle en la Revista de Acústica, D. Antonio Calvo-Manzano, anterior Secretario de la Sociedad Española de Acústica, redactó el siguiente recordatorio, de parte de los socios de la SEA:

«El pasado día 29 de septiembre conocimos la triste noticia de que, tras una larga enfermedad, fallecía nuestro querido amigo Joaquín.

Joaquín Pérez-Tinao Gómez-Salazar ha sido la persona que, durante más de veinte años, junto con su gran equipo de profesionales de la empresa Vidyson por él fundada, ha colaborado con la SEA en todos los congresos, tanto nacionales como internacionales, en los aspectos de la comunicación audiovisual.

De formación académica Químico, Joaquín dejó muy pronto esta profesión para dedicarse, allá por los años 80 del siglo pasado, al incipiente mundo de la comunicación audiovisual, siendo uno de los pioneros en este campo de actividades.

Nuestro primer contacto con Joaquín y su equipo fue en el año 2002 con motivo del Forum Acusticum

celebrado en Sevilla, donde ya se puso de manifiesto la profesionalidad con la que desarrollaban su trabajo, dando comienzo aquí una larga colaboración mantenida durante los años siguientes, destacando el gran despliegue de medios y personal que se utilizaron con motivo del congreso ICA 2007 y el Internoise 2019, ambos celebrado el Palacio Municipal de Congresos y Exposiciones de Madrid.

Los que hemos trabajado muy de cerca con Joaquín durante estos años, hemos podido conocer sus grandes cualidades personales. Su carácter afable estaba siempre dispuesto a complacer todas las peticiones y sugerencias que se le hacían con respecto al cometido de su función. Su gran simpatía, su buen humor, sus dotes de buen conversador, su disposición a dar cumplimiento a todo lo que se pedía para el mejor desarrollo de los congresos, hacían de Joaquín una persona excepcional que será siempre recordada por nosotros.

A su esposa, nuestra querida Concha, inseparable compañera de Joaquín en su trabajo y a sus hijos, también queridos Joaquín y Carlos, les hacemos llegar el más sentido pésame de todos los miembros de la SEA.

Que en paz descanse»

Año 2025

ISAV2025 - 15th International Conference of Acoustics and Vibration

- 24-25 Diciembre

Tehrán, Irán

Web: <https://2025.isav.ir/>

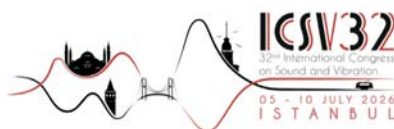


ICSV32 - International Congress on Sound and Vibration

- 5-10 Julio

Estambul, Turquía

Web: <https://www.icsv32.org/>



TECNIACÚSTICA 2026 - 57º Congreso Español de Acústica

- 21-23 Octubre

Granada, España

Web: <https://www.tecniacustica.es/TECNIACUSTICA2026/>



Año 2026

DAGA 2026 - 52nd Annual Meeting on Acoustics

- 23-26 Marzo

Dresden, Alemania

Web: <https://www.daga2026.de/>



Inter-noise 2026 - 55th International Congress & Exposition on Noise Control Engineering

- 9-12 Agosto

Adelaide, Australia

Web: <https://internoise2026.org/>



BNAM 2026 - Baltic-Nordic Acoustic Meeting 2026

- 4-6 Mayo

Gotemburgo, Suecia

Web: <https://bnam2026.org/>



ICASSP2026 - IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing

- 4-8 Mayo

Barcelona, España

Web: <https://2026.ieeeicassp.org/>



FIA2026 - XIV Congreso Iberoamericano de Acústica

- 12-14 Agosto

Lima, Perú

Web: <https://fia-acustica.org/>



Forum Acusticum 2026 - The Annual European Conference on Acoustics and Noise Control Engineering

- 8-12 Septiembre

Graz, Austria

Web: <https://forum-acusticum.org/fa2026/>



Año 2027

ICASSP2027 - IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing

- 16-21 Mayo

Toronto, Canadá

Web: <https://ieeicassp.org/event/icassp-2027-toronto/>

Forum Acusticum 2027 - Acoustics '27 (conferencia conjunta con la Acoustical Society of America)

- 21-25 Junio 2027

Bruselas, Bélgica

Web: <https://forum-acusticum.org/fa2027/>



ICTCA 2027 - 17th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics

- 30 Agosto-2 Septiembre

Santiago de Compostela, España

Web: <https://ictca2027.udc.es/>



Año 2028

ICA 2028/Forum Acusticum 2028

- 11-14 Septiembre

Madeira, Portugal

Web: <https://ica-fa-madeira2028.org/>

Instituciones y empresas miembros de la S.E.A.

AAC CENTRO DE ACÚSTICA APLICADA, S. L.
<http://www.aacacustica.com>

ACÚSTICA I ENERGÍA LUZEA S. L.
<https://www.luzea.net/>

ACUSTTEL ACÚSTICA Y TELECOMUNICACIONES, S. A.
<http://www.acusttel.com>

ALAVA INGENIEROS, S. A.
<http://www.alava-ing.es>

AMORIM CORK COMPOSITES
<http://www.amorimcorkcomposites.com>

ANDIMAT. ASOCIACIÓN NACIONAL DE INDUSTRIAS
DE MATERIALES AISLANTES
<http://www.andimat.es>

ARAU ACÚSTICA
<http://www.arauacustica.com>

ARQUILAV. LABORATORIO DE ACÚSTICA Y VIBRACIONES
APLICADAS A LA EDIFICACIÓN, EL MEDIO AMBIENTE
Y EL URBANISMO
<http://arquilav.aq.upm.es>

ASOCIACIÓN NACIONAL DE AUDIOPROTESISTAS
<http://www.audioprotesistas.org>

AUDIOTEC, INGENIERÍA Y CONTROL DEL RUIDO
<http://www.audiotec.es>

AYUNTAMIENTO DE MADRID. DELEGACIÓN
DE MEDIO AMBIENTE
<http://www.munimadrid.es>

AYUNTAMIENTO DE MÁLAGA
<http://www.malaga.eu>

AYUNTAMIENTO DE VALENCIA. SERVICIO
DE CONTAMINACIÓN ACÚSTICA
<http://www.valencia.es>

CESVA INSTRUMENTS, S. L. U.
<http://www.cesva.com>

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS
DE TELECOMUNICACIÓN
<http://www.coitt.es>

DANOSA, DERIVADOS ASFÁLTICOS NORMALIZADOS, S. A.-
DELEGACIÓN MADRID
<http://www.danosa.com>

DATAKUSTIK GMBH
<http://www.datakustik.com/en>

DB COVER SOLUTIONS, S. L.
<http://dbcover.com/es>

DECIBEL INGENIEROS, S. L.
<http://www.decibel.es>

DECUSTIK
<http://www.decustik.com>

ENVIROSUITE IBÉRICA, S. A. - EMS BRÜEL & KJÆR
www.envirosuite.com/es

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
DE TELECOMUNICACIÓN DE MÁLAGA
<http://www.uma.es>

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN
<http://www.etsist.upm.es/>

EUROCONTROL, S. A.
<http://www.eurocontrol.es>

FUNDACIÓN TECNALIA RESEARCH & INNOVATION
<http://www.tecnalia.com>

GRAS SOUND & VIBRATION
<https://www.grasacoustics.com/>

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ACÚSTICA VIRTUAL
UPV-VEG
<http://www.upv.es/contenidos/ACUSVIRT/>

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INSTRUMENTACIÓN
Y ACÚSTICA APLICADA -I2A2-
<https://blogs.upm.es/i2a2/>

HEAD ACOUSTIC GMBH
<https://www.head-acoustics.com/>

HISPALYT, ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES
DE LADRILLOS Y TEJAS
<http://www.hispalyt.es/>

HOTTINGER BRÜEL & KJÆR IBÉRICA, S. L.
<http://www.bksv.es>

IDEATEC ADVANCED ACOUSTIC SOLUTIONS, S. L. U.
www.ideatec.es

INGENIERÍA ACÚSTICA GARCÍA-CALDERÓN, S. L.
<http://www.garcia-calderon.com>

INGENIERÍA PARA EL CONTROL DEL RUIDO, S. L.
<http://www.icrsl.com/es>

INGENIERÍA Y SERVICIOS EN ACÚSTICA,
IBERACÚSTICA, S. L.
<http://www.iberacustica.com>

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN
EDUARDO TORROJA CSIC
<http://www.ietcc.csic.es/>

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA GESTIÓN
INTEGRADA DE ZONAS COSTERAS. ESCUELA
POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDIA
<http://www.upv.es/entidades/EPSG/>

INSTITUTO DE TECNOLOGÍAS FÍSICAS Y DE LA
INFORMACIÓN «LEONARDO TORRES QUEVEDO»-
ITEFI (CSIC)
<http://www.itefi.csic.es/>

ISINAC ACOUSTICS WORLD, S. L.
<http://www.isinac.com>

LABORATORIO DE ACÚSTICA APLICADA.
UNIVERSIDAD DE LEÓN
<http://www.unileon.es/>

LABORATORIO DE ACÚSTICA. UNIVERSIDAD
DE EXTREMADURA
<http://www.unex.es/>

LABORATORIO DE INGENIERÍA ACÚSTICA Y
VIBRACIONES. UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ
<http://www.umh.es>

LABORATORIO DE INGENIERÍA ACÚSTICA.
UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
<http://www.uca.es>

MASON INDUSTRIES INC
<https://mason-ind.com/>

MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA
<https://www.mitma.gob.es/>

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y RETO DEMOGRÁFICO
<https://www.miteco.gob.es/es/>

OVE ARUP & PARTNERS SAU
<http://www.arup.com>

OVERNOISE, S. L.
<https://vernoise.es/>

PROCESO DIGITAL DE AUDIO, S. L.
<http://www.ecudap.com/>

ROCKWOOL PENINSULAR, S. L.
<http://www.rockwool.es>

ROTHOBLAAS IBÉRICA, S. L.
<https://www.rothoblaas.es/>

SAES. SOCIEDAD ANÓNIMA DE ELECTRÓNICA
SUBMARINA
<http://www.electronica-submarina.com>

SAINT-GOBAIN ISOVER IBÉRICA, S. L.
<http://www.isover.net>

SILENTIA, INGENIERÍA ACÚSTICA, S. L.
<http://www.silentia.es>

SINCOSUR INGENIERÍA SOSTENIBLE
<http://www.sincosur.es/>

SOUND OF NUMBERS, S. L.
<http://www.soundofnumbers.net/>

STO SDF IBÉRICA SLU
<http://www.sto.es>

SVANTEK ESPAÑA, S. L.
<http://www.svantek.es>

TASVALOR MEDIO AMBIENTE S.L.
<http://www.tma-e.com/>

TRACK-NOISE S.L.
<https://www.track-noise.com/>

UNIVERSITAT D' INGENIERIA I ARQUITECTURA
LA SALLE FUNDITEC
<http://www.salleurl.edu>

URSA IBERICA AISLANTES, S. A.
<http://www.ursa.es>

VIBLENS, S. L. U.
www.viblens.com

VIBRACHOC PAULSTRA, S. A.
<http://www.vibrachoc.es>



SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA

secretaria@sea-acustica.es

www.sea-acustica.es