

Diseño y caracterización de un tubo de impedancias con sensores acústicos de bajo costo

Jaime Ricardo González Romero¹, Adalberto Zamudio¹, Guillermo García Torales²

¹Departamento de Física, Universidad de Guadalajara, Av. Revolución No. 1500, Guadalajara, Jalisco, México

²Departamento de Electro-fotónica, Universidad de Guadalajara, Av. Revolución No. 1500, Guadalajara, Jalisco, México

Resumen: En este trabajo se presenta el diseño, construcción y caracterización de un tubo de impedancias acústicas accesible, adecuado para análisis en el rango de 20 Hz a 4 kHz. El dispositivo fue fabricado con materiales comerciales y emplea una configuración de dos sensores acústicos económicos. Se describe el desarrollo de un algoritmo para la calibración de los sensores, basado en la norma ASTM E1050-12, reemplazando el analizador de espectro por un osciloscopio digital. Las señales adquiridas en el dominio del tiempo se transforman al dominio de la frecuencia para obtener su espectro y aplicar el procedimiento de calibración. Aunque el sistema aún está en fase de validación, los resultados preliminares indican un comportamiento coherente con lo esperado teóricamente. Este desarrollo busca fomentar el uso de herramientas accesibles para la caracterización acústica de materiales en contextos educativos o de investigación aplicada.

Palabras clave: acústica; tubo de impedancias; sensores acústicos; calibración.

1. Introducción

La caracterización acústica de materiales desempeña un papel fundamental en el desarrollo de nuevas tecnologías en la construcción y en la ciencia de materiales [1-3]. Su importancia radica en el desarrollo de materiales con menor impacto ambiental, y en la necesidad de mitigar la contaminación acústica, un fenómeno presente en todos los entornos urbanos e industriales, que puede causar efectos nocivos tanto físicos como psicológicos en los seres vivos [4-7]. Se han establecido métodos estandarizados de medición y calibración, como la norma ASTM E1050-12 [8] y la norma UNE-EN ISO 10534-2:2024 [9], las cuales definen procedimientos específicos para determinar la impedancia acústica, el coeficiente de absorción, o la pérdidas por transmisión mediante tubos de impedancia acústica [10-12].

Actualmente, existen en el mercado diversos sistemas para la caracterización acústica de materiales, que cumplen con las normativas internacionales y ofrecen alta precisión, como es el caso de los tubos de impedancia industriales mostrado en la Figura 1a. Sin embargo, estos equipos tienen un costo elevado y requieren de componentes adicionales para su operación, como analizadores de espectro, fuentes acústicas de banda ancha, micrófonos de alta sensibilidad o software licenciados. Estas condiciones limitan su implementación en entornos educativos o laboratorios con recursos restringidos, dificultando el acceso a prácticas experimentales.

Recibido: junio 02, 2025

Aceptado: agosto 08, 2025

autor de correspondencia:

jaimer.gonzalezr@academicos.udg.mx

© 2025 Revista Ciencia Aplicada



Figura 1. Tubos de impedancia acústica comercial y propuesto. a) Tubo de impedancias acústicas modelo 4206 de Brüel & Kjær®. Imagen tomada del catálogo en línea del fabricante. b) Tubo de impedancias acústicas diseñado.

Para subsanar lo anterior, se describe una alternativa accesible para la implementación parcial de la norma ASTM E1050-12, mediante la construcción de un tubo de impedancias, equipado con sensores acústicos económicos y un osciloscopio como se muestra en la Figura 1b. El sistema presentado fue diseñado con materiales comercialmente disponibles, con el objetivo de ser utilizado en contextos educativos o en estudios básicos de caracterización acústica en el rango de 20 Hz a 4 kHz. Dado que el uso de este tipo de sensores implica limitaciones en su respuesta en frecuencia, se desarrolló un algoritmo de calibración que compensa dichas variaciones. El algoritmo realiza la transformación de las señales en el dominio del tiempo mediante la transformada rápida de Fourier (FFT), y aplica una corrección basada en la comparación de la respuesta en frecuencia de ambos sensores.

En este artículo, se describe primero el diseño y construcción del tubo de impedancias, los materiales empleados y su configuración general bajo las consideraciones de la norma. Posteriormente, se detalla el sistema de adquisición y el tipo de sensores utilizados, denotando las consideraciones necesarias para su calibración. La sección metodológica incluye el desarrollo del algoritmo de procesamiento de señales, desde la captura de datos temporales hasta la obtención de la respuesta espectral y su posterior compensación. Finalmente, se presentan los resultados del sistema calibrado, junto con una discusión de sus limitaciones, y se concluye con una reflexión sobre su potencial en entornos educativos y de investigación con recursos limitados.

2. Materiales y métodos

2.1 Diseño del tubo de impedancias

El tubo de impedancias fue fabricado en cloruro de polivinilo (PVC) rígido, debido a su disponibilidad comercial, de bajo presupuesto y facilidad de manipulación. El diámetro interno D_i es de aproximadamente 51 mm, mientras que el externo D_e es de aproximadamente 65 mm. El tubo está dividido en dos secciones, unidas por un porta muestras de longitud $l_m = 15.6$ mm. La primera sección, P_1 , contiene la fuente

acústica y dos orificios para los sensores S_1 y S_2 . Esta configuración se utiliza tanto para la medición del coeficiente de absorción acústico como para la calibración de los sensores. La segunda sección, P_2 , aloja dos orificios más para un segundo par de sensores con la finalidad de medir las pérdidas por transmisión y un extremo intercambiable para colocar terminaciones rígidas o mitigadoras. Las longitudes de P_1 y P_2 son $L_1 = 440 \text{ mm}$ y $L_2 = 350 \text{ mm}$, respectivamente, lo cual permite cubrir el rango de frecuencias deseado y facilita la reconfiguración del sistema para distintos tipos de mediciones acústicas.

En un extremo de P_1 , se diseñó un soporte a medida para acoplar la fuente acústica al tubo. Este componente, impreso en 3D, incluye una capa intermedia de material absorbente de vibraciones de etilvinilacetato (goma EVA) de 7 mm de espesor para evitar que las vibraciones mecánicas de la bocina se transmitan directamente al tubo. La unión se realiza a presión, aplicando vaselina entre las superficies de contacto para mejorar el sellado acústico y minimizar pérdidas por fugas. En el extremo de P_2 , se utilizó un soporte impreso con características similares para permitir la instalación intercambiable de terminadores rígidos o absorbentes, asegurando también un buen sellado acústico.

La longitud total del tubo, de aproximadamente 805 mm , fue seleccionada para permitir mediciones confiables en el rango de frecuencias de trabajo del tubo. Este rango depende de la relación entre la longitud del tubo, el diámetro interno y la separación entre sensores, en función de la longitud de onda del sonido. Esta elección busca minimizar los efectos de los modos de resonancia longitudinales. La frecuencia mínima f_{min} , y la frecuencia máxima de trabajo f_{max} del tubo están dadas por

$$f_{min} > \frac{(0.01)c}{S} [\text{Hz}], \quad (1)$$

$$f_{max} < \frac{Kc}{D_i} [\text{Hz}], \quad (2)$$

donde c es la velocidad del sonido en el medio de propagación (típicamente aire, 343 m/s), S , en metros, es la distancia de separación de los micrófonos, D_i , también en metros, es el diámetro interno del tubo, y $K = 0.586$ es una constante de proporcionalidad de geometría para tubos cilíndricos.

Comúnmente, se despeja S de la ecuación (1) fijando una frecuencia mínima deseada. En este caso, para cubrir el límite inferior del rango auditivo humano (20 Hz), se obtiene, por lo tanto $S > (0.01c)f_{min}^{-1} > 0.1715 \text{ m}$. Sin embargo, f_{max} debe de calcularse con la ecuación (2) para adaptarse al tubo con el que se trabaje. En nuestro caso, $f_{max} < (0.586 * 343)(51 \times 10^{-3})^{-1} < 3.941 \text{ kHz}$.

La fuente acústica es una bocina de 50 mm de diámetro con 4 Ω de impedancia, potencia pico de 5 W y rango de respuesta entre 20 Hz y 18 kHz, montada en el soporte 3D, como se muestra en la Figura 2. La distancia l_1 , que separa la fuente acústica con el sensor S_1 , se determina para asegurar que se trabajan con ondas planas y despreciar los efectos de los bordes de la bocina mientras se reducen las reflexiones difusas o turbulentas, de la forma

$$l_1 > 3(D_i) [m], \quad (3)$$

mientras que la distancia l_2 , entre el sensor S_2 y la muestra se obtiene de la forma

$$l_2 > 0.5(D_i) [m]. \quad (4)$$

En nuestro sistema, las distancias se fijaron en $l_1 = 0.160$ m, $l_2 = 0.03$ m y $S = 0.18$ m valores elegidos por conveniencia y respetando los límites mínimos requeridos por las ecuaciones (1) a (4).

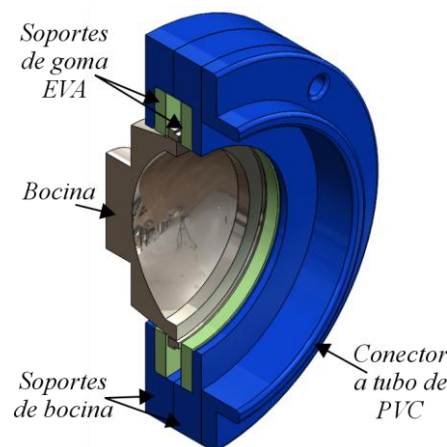


Figura 2. Detalle del montaje de la fuente acústica en el tubo mediante el soporte impreso en 3D.

El extremo de P_2 incluye una tapa intercambiable de diámetro interno igual a D_e , que permite colocar tanto un terminador rígido de aluminio (diámetro igual a D_i , espesor de 5 mm) o un terminador absorbente de espesor variable. Los orificios para sensores en la sección P_2 se encuentran a distancias similares a las de P_1 , pero dispuestos en orden inverso respecto a la dirección de propagación del sonido.

El tubo se montó sobre bases de sujeción hechas a medida e impresas en 3D, las cuales incluyen una capa de goma EVA de 2 mm de espesor que actúa como aislante para evitar el acoplamiento de vibraciones con el banco de trabajo. Asimismo, cada sensor cuenta con un soporte especial que garantiza su fijación hermética y minimiza pérdidas acústicas en los puntos de inserción.

Las dimensiones del tubo y la posición de los sensores fueron seleccionadas siguiendo las recomendaciones establecidas en la norma, a fin de garantizar que el

sistema opere dentro de los límites adecuados para la caracterización de materiales absorbentes en el rango de interés. En particular, la separación entre sensores, la ubicación de las terminaciones y la longitud total del tubo fueron definidas para minimizar errores asociados a la interferencia de modos estacionarios, efectos de borde y asegurarse que se trabaja con ondas planas.

Todas las piezas impresas en 3D fueron fabricadas en polietileno tereftalato de glicol (PET-G), de la marca Protej®, en colores blanco y negro. Se utilizó una densidad de relleno del 30%, con patrón tipo panal, y tres paredes tanto internas como externas. La Figura 3a muestra un esquema ilustrativo del sistema completo, mientras que en la Figura 3b se detallan las dimensiones de la sección P1.

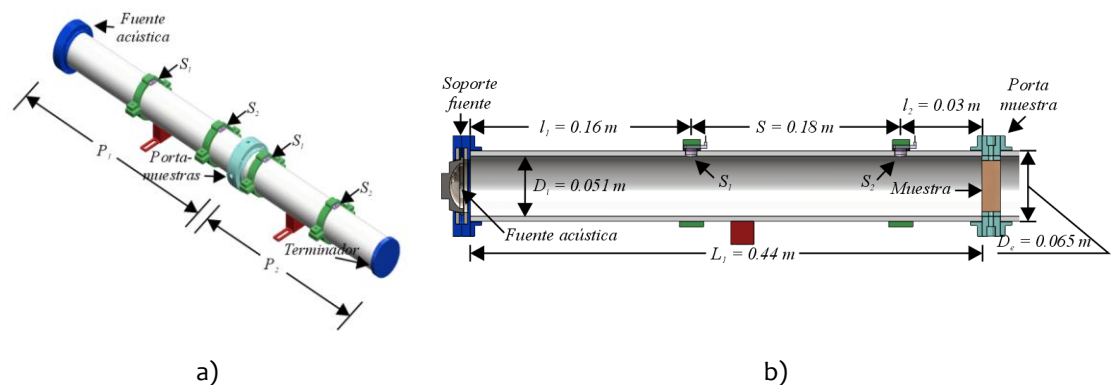


Figura 3. Diagrama y vista a detalle del tubo de impedancia. a) Esquema del tubo. El diseño modular del sistema permite su configuración según los requerimientos de la medición. b) Dimensiones de P1. Se muestran los diámetros D_i y D_e , la ubicación del barreno S_1 y S_2 , la longitud entre fuente y sensor l_1 , la longitud de separación entre sensores S , y la longitud entre el segundo sensor y la muestra l_2 .

2.2 Sensores acústicos y calibración

Para la adquisición de la señal acústica en el tubo se emplearon dos micrófonos omnidireccionales de condensador electret, modelo BCM9765P-44, con respuesta nominal en el rango de 20 Hz a 16 kHz. Cada micrófono se acopló a un preamplificador MAX4466, con ganancia ajustable hasta 20 dB y alimentación de 5 V DC. La elección de estos componentes se basó en su disponibilidad comercial, fácil obtención y simplicidad de integración, resultando adecuado para aplicaciones experimentales y educativas en el rango audible.

Los sensores se insertaron en los orificios S_1 y S_2 de las secciones P_1 y P_2 , con un diámetro aproximado de 10 mm, correspondiente a la carcasa metálica del micrófono. Para garantizar un sellado acústico, se empleó una junta tórica (o-ring) de 9 mm de diámetro interno y 2 mm de espesor, colocada entre el cuerpo del sensor, la placa de circuito y el tubo. Se utilizó vaselina comercial como material de sellado reduciendo así holgura asociadas a las tolerancias mecánicas. Finalmente, se

diseñaron soportes impresos en 3D que permitieron un montaje preciso y hermético de los sensores, como se muestra en el esquemático de la Figura 4.

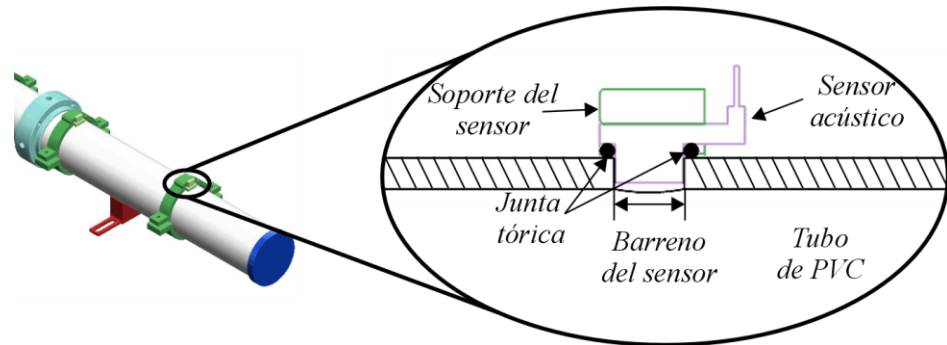


Figura 4. Detalle del montaje del sensor acústico en el tubo. Una junta tórica de 9 mm de diámetro interno y 2 mm de espesor entre el cuerpo del sensor, la placa de circuito y el tubo, asegura el sellado acústico en los puntos de inserción. Los sensores se montaron sobre soportes impresos en 3D, diseñados para garantizar un ensamblaje hermético.

2.3 Sistema de adquisición y fuente acústica

La señal acústica proveniente de los sensores fue adquirida mediante un osciloscopio digital Siglent® SDS 1204CFL, 200 MHz, 2 GSa/s, empleando captura única sincronizada al flanco de subida del pico máximo de la señal generada. Se utilizó una ventana de tiempo de 180 ms, suficiente para cubrir un barrido completo en frecuencia desde 20 Hz hasta 4 kHz, registrando de manera simultánea las señales de ambos sensores. No se aplicaron filtros digitales ni promedios, aunque se utilizó acoplamiento en AC en las sondas de medición para eliminar el *offset* intrínseco de los micrófonos.

Las señales obtenidas en el dominio temporal se procesan posteriormente mediante un algoritmo propio, el cual realiza la FFT sobre ambas señales, calcula su relación espectral compleja y compensa posibles diferencias de fase y amplitud. El resultado es una función de transferencia que permite calibrar uno de los sensores respecto al otro, como lo exige la norma.

La señal de prueba fue generada mediante un generador de funciones Unit-T® UTG392E, 60MHz, 200 MSa/s configurado en modo de barrido logarítmico de 180 ms. Se utilizó una señal senoidal con un rango de frecuencia de 20 Hz a 4 kHz y una amplitud de 250 mV pico a pico, suficiente para evitar la saturación de los preamplificadores en el pico de respuesta frecuencial máximo del tubo.

2.4 Algoritmo de calibración

La norma establece un procedimiento para la calibración de sistemas con dos micrófonos montados en las paredes de un tubo. Uno de los requisitos fundamentales es la compensación relativa entre ambos sensores, es decir, la

determinación de su sensibilidad espectral individual, incluso cuando son del mismo modelo. Esto se debe a que, por diferencias en las posiciones relativas y tolerancias mecánicas, los sensores no presentan una respuesta espectral idéntica, haciendo imprescindible el proceso de calibración.

En equipos comerciales, este procedimiento suele integrarse mediante analizadores de espectro, sistemas embebidos y software especializado que transforma automáticamente las señales del dominio temporal al espectral, obteniendo su fase y magnitud en función de la frecuencia. Estos sistemas permiten calibrar los sensores “con un clic”, lo que representa una ventaja operativa, aunque a un costo considerable. Esta situación abre oportunidades para propuestas basadas en herramientas accesibles y económicas.

En este trabajo, el registro de señales se realiza en el dominio temporal mediante un osciloscopio, y el procesamiento posterior se lleva a cabo en MATLAB® para cumplir con los requisitos establecidos por la norma. No se emplea la función FFT incorporada en el osciloscopio debido a su baja resolución espectral en el rango audible.

A modo de resumen, la Figura 5 presenta un diagrama del proceso de calibración según lo establecido en la norma. El primer paso consiste en medir el nivel de presión sonora (SPL) con la fuente acústica encendida y apagada, utilizando un terminador absorbente en el extremo de P1. Esto permite calcular la relación señal a ruido (SNR) de los micrófonos. Las mediciones deben promediarse para reducir la incertidumbre.

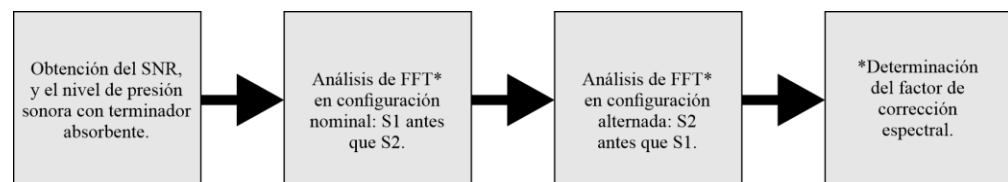


Figura 5. Diagrama del proceso de calibración según la norma ASTM E1050-12. Se especifica con un asterisco en cuál parte del procedimiento se reemplaza la norma con el algoritmo propuesto.

En el segundo paso, se analiza la señal en el dominio de la frecuencia mediante una FFT utilizando una ventana Hanning, bajo condiciones idénticas para ambos sensores. Este es el punto que es reemplazado más adelante con el algoritmo desarrollado, que procesa la señal adquirida por el osciloscopio y calcula su espectro.

El tercer paso, se mide la función de transferencia compleja para cada sensor en dos configuraciones diferentes, *I* e *II*, comenzando con su configuración estándar *I* (*S*₁ en el orificio *S*₁, *S*₂ en el orificio *S*₂). Esta función de transferencia se expresa como:

$$\bar{H}^I = |\bar{H}^I|e^{j\bar{\phi}^I} = \bar{H}_r^I + j\bar{H}_i^I, \quad (5)$$

donde $\bar{H}_r^I$ y $j\bar{H}_i^I$ representan las partes real e imaginaria, respectivamente, de la respuesta espectral de la configuración I . A partir del siguiente paso, los procedimientos descritos se complementan mediante el algoritmo propuesto.

Como cuarto paso, se intercambian las posiciones de los sensores (S_2 en el orificio S_1 y S_1 en el orificio S_2) para obtener una segunda función de transferencia, denotada como:

$$\bar{H}^{II} = |\bar{H}^{II}|e^{j\bar{\phi}^{II}} = \bar{H}_r^{II} + j\bar{H}_i^{II}. \quad (6)$$

Finalmente, se determina el factor complejo de corrección espectral $\bar{H}_c$, que representa la diferencia en magnitud y fase entre ambos sensores. Este factor se calcula a partir del producto de las funciones de transferencia obtenidas en ambas configuraciones, según:

$$\bar{H}_c = \sqrt{(\bar{H}^I \times \bar{H}^{II})} = |\bar{H}_c|e^{j\bar{\phi}_c}. \quad (7)$$

Este factor permite compensar las discrepancias de fase y amplitud entre los sensores, asegurando así la validez de las mediciones posteriores de impedancia acústica conforme a lo exigido por la norma.

En la Figura 6 se presenta el diagrama de flujo del método propuesto. Este se divide en tres partes principales: parte 1, inicialización del entorno y carga de archivos; parte 2, aplicación de la FFT y promediado de señales; y parte 3, cálculo del factor de corrección espectral complejo $\bar{H}_c$ así como la generación de gráficas comparativas.

La primera parte corresponde a la carga de los archivos provenientes del osciloscopio, a los cuales previamente se les ha eliminado el encabezado y ajustado el vector de tiempo para que inicie en cero. Esta modificación es necesaria debido a que el osciloscopio inicia su conteo de tiempo en cero en el momento del disparo (es decir, cuando detecta el pico máximo de amplitud de la señal), y no necesariamente cuando la fuente acústica comienza a emitir a 20 Hz. En esta etapa también se inicializan las celdas que almacenarán los vectores de tiempo, las señales registradas y la nomenclatura asociada a las posiciones de los sensores. Finalmente, se calcula de forma automática la frecuencia de muestreo, el número total de muestras y el vector de frecuencias correspondiente.

En la segunda parte, se aplica la FFT a cada una de las señales obtenidas en las dos posiciones de los dos sensores. También se elimina la componente DC (valor medio) de las señales y se compensa la amplitud. Luego, se realiza el promediado de las 10 señales obtenidas, agrupándolas por sensor y posición. Las combinaciones resultantes son: H11 (sensor 1 en posición del sensor 1), H12 (sensor 1 en posición

del sensor 2), H21 (sensor 2 en posición del sensor 1) y H22 (sensor 2 en posición del sensor 2). En esta fase, el usuario puede decidir si se requiere la generación de gráficas de magnitud y fase de las señales promediadas, con fines de análisis.

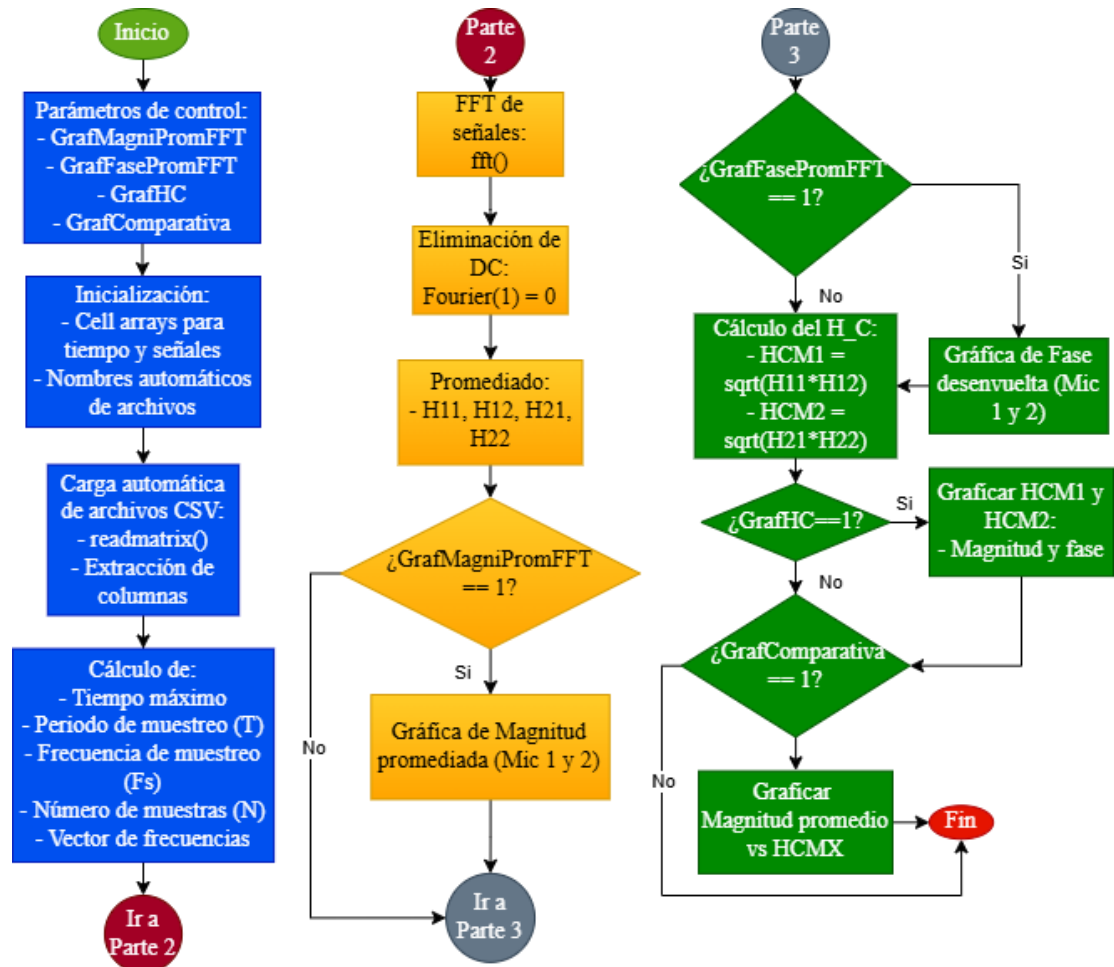


Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto para el procesamiento de señales acústicas. El proceso se divide en tres partes: carga e inicialización, análisis espectral, y cálculo del factor de corrección.

Finalmente, en la tercera parte se calcula el factor complejo de corrección espectral $\bar{H}_c$, y se ofrece la opción de graficar su magnitud y fase, así como una comparación visual entre este factor y las señales promediadas.

Si bien se han respetado los principios fundamentales del método de dos micrófonos descrito en la norma, se introdujeron modificaciones sustanciales en los procesos de adquisición y procesamiento de datos. Entre ellas destacan el uso de sensores económicos, la sustitución del analizador de espectro por un osciloscopio, y el desarrollo de un algoritmo que aplica la FFT para obtener el factor complejo de corrección espectral. Con ello, el sistema queda listo para iniciar el análisis acústico

de materiales. Estas modificaciones fueron implementadas con el objetivo de establecer una metodología de calibración funcional, reproducible y accesible.

3. Resultados

Se procesaron diez señales adquiridas en cada configuración sensor/posición. En la Figura 7 se muestran un subconjunto de estas señales (tres por configuración) y sus respectivos promedios, clasificados por la nomenclatura *SXYZ*, donde *SX* indica el sensor utilizado (*S1* o *S2*), *Y* la posición del sensor (1 o 2), y *Z* el número de experimento. Para no saturar la imagen, únicamente se graficaron los primeros tres experimentos por configuración. Todas las señales mostraron comportamientos coherentes tanto en magnitud (Figura 6a) como en fase (Figura 6b), lo que confirma la repetibilidad del sistema y la estabilidad de la adquisición.

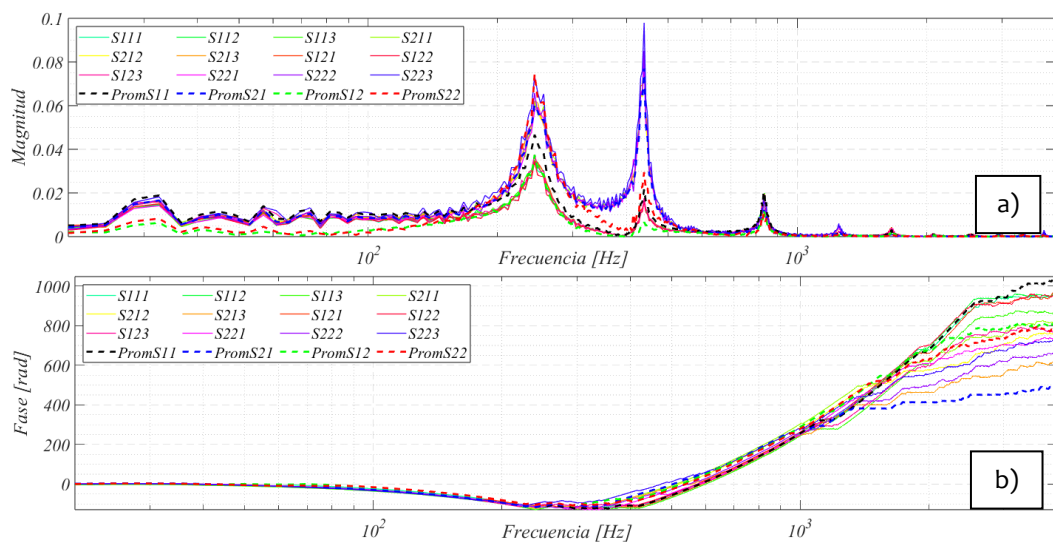


Figura 7. Subconjunto de señales adquiridas en distintas configuraciones de sensor y posición (*S1* y *S2* en posiciones 1 y 2). a) Magnitud. b) Fase. Se observan tres repeticiones por configuración, junto con su promedio correspondiente. Las señales se expresan en función de la frecuencia.

Sin embargo, como se observa en la Figura 7a, el tubo de impedancias presenta dos armónicos dominantes, aproximadamente en 244 Hz y 439 Hz, lo que indica su rango operativo principal. A partir de estas frecuencias, la magnitud de la respuesta disminuye de forma notable en altas frecuencias, en concordancia con lo reportado en la literatura. También se aprecia una diferencia en la magnitud de las señales promediadas según la posición del sensor: para un mismo sensor, las respuestas son muy similares entre posiciones, salvo en las bajas frecuencias, donde se detecta una ligera variación.

En contraste, como se observa en la Figura 7b, las diferencias de fase entre posiciones se vuelven más marcadas conforme aumenta la frecuencia. Este desfase entre señales, tanto en magnitud como en fase, es compensado parcialmente

mediante el cálculo del factor complejo de corrección, utilizado en la caracterización acústica de materiales. Aquellos efectos que no son corregidos por $\bar{H}_c$ definen los límites operativos del tubo.

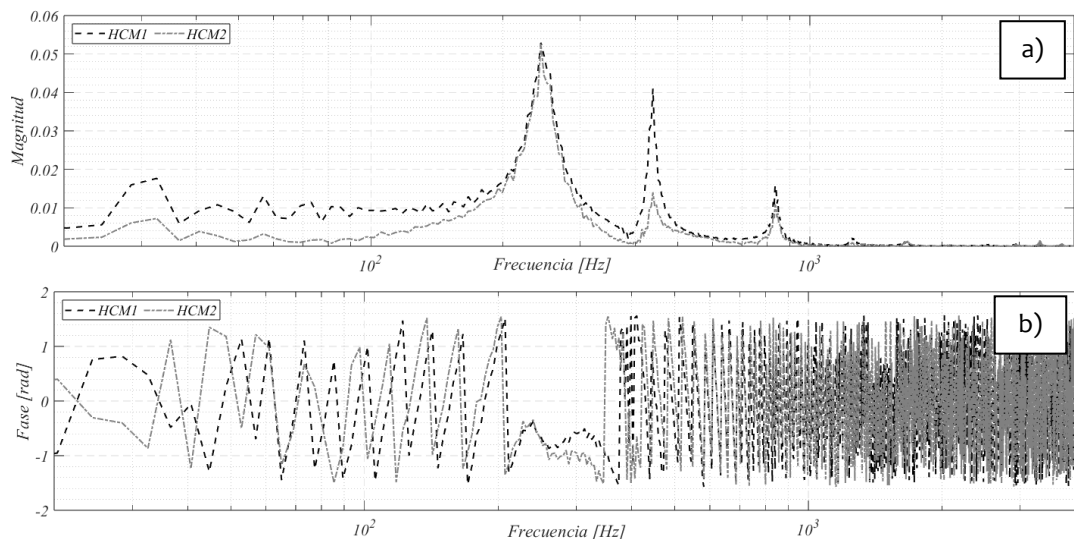


Figura 8. Factor complejo de corrección $\bar{H}_c$ calculado mediante los métodos de promediado HCM1 mostrado como la línea negra de guiones, y HCM2 en línea gris de guiones y puntos. a) Magnitud de $\bar{H}_c$. b) Fase de $\bar{H}_c$. Los resultados determinan la banda útil del sistema entre 30 Hz y 1500 Hz, donde se mantiene la estabilidad y coherencia espectral.

En la Figura 8a se muestra la magnitud, y en la figura 8b la fase de $\bar{H}_c$, calculado a partir de las combinaciones de sensores y posiciones. Se presentan dos curvas, correspondientes a los dos métodos de promediados empleados: HCM1 (verde) y HCM2 (azul).

En la magnitud de $\bar{H}_c$, se identifican claramente dos armónicos dominantes, centrados en aproximadamente 244 Hz y 439 Hz, consistentes con el comportamiento resonante observado previamente en las señales individuales. Fuera de estas frecuencias, la magnitud de $\bar{H}_c$ disminuye drásticamente, lo cual indica una menor sensibilidad del tubo en rangos superiores y establece el límite superior operativo del sistema. En las regiones bajas (< 100 Hz), la magnitud es relativamente pequeña lo que se le atribuye a la sensibilidad de la fuente acústica. Por otro lado, en las regiones altas (>1 kHz) la magnitud es baja y relativamente ruidosa, lo que podría atribuirse a una menor relación señal/ruido y a interferencias en la medición o respuesta frecuencial de los sensores.

Respecto a la fase, se observa un comportamiento relativamente estable y coherente, con pendientes negativas y positivas secuenciales. Sin embargo, aunque la fase comienza a mostrar oscilaciones rápidas y dispersión, particularmente por encima de 1 kHz, se mantienen el mismo comportamiento. Por otro lado, las

pendientes de la fase a partir de 1 kHz son más planas, lo cual indica un menor disturbio de la fase en las altas frecuencias.

En conjunto, los resultados obtenidos para $\bar{H}_c$ permiten definir una banda útil de operación del tubo entre aproximadamente 30 Hz y 1500 Hz, dentro de la cual tanto la magnitud como la fase del factor presentan estabilidad y coherencia suficientes para realizar mediciones confiables.

4. Conclusiones

El análisis de las señales revela que el tubo de impedancias opera de forma consistente con lo esperado en frecuencias bajas, con una respuesta estable y repetible. Sin embargo, a partir de los 1.5 kHz se incrementan los errores debido a la dispersión de fase y a la disminución de la relación señal/ruido, lo cual sugiere interpretar los resultados con cautela en ese rango.

Si bien el sistema es operativo hasta aproximadamente 4 kHz, su utilización más confiable se encuentra en frecuencias inferiores, donde la respuesta es más estable y precisa. Para mitigar estas limitaciones, se plantea emplear un tubo metálico y un sistema de sujeción más robusto, que permitan modificar las condiciones de resonancia y mejorar la estabilidad en frecuencias altas. A pesar de estas restricciones, la propuesta cumple su objetivo como una herramienta accesible, reproducible y económico, adecuada para aplicaciones educativas y experimentales en la caracterización acústica de materiales.

Agradecimientos

R.G.R. expresa su agradecimiento a la Universidad de Guadalajara por el respaldo institucional brindado para la realización de este trabajo, así como a Miriam Y. Arriaga por su valiosa guía y orientación durante el desarrollo e implementación del proyecto.

Referencias

1. H. Ge et al., "Breaking the barriers: advances in acoustic functional materials," *National Science Review*, vol. 5, no. 2, pp. 159–182, 2018.
2. V. Desarnaulds, E. Costanzo, A. Carvalho, and B. Arlaud, "Sustainability of acoustic materials and acoustic characterization of sustainable materials," in *Proceedings of the 12th international congress on sound and vibration*, 2005.
3. N. Hemmati et al., "Acoustic and thermal performance of wood strands-rock wool-cement composite boards as eco-friendly construction materials," *Construction and Building Materials*, vol. 445, p. 137935, 2024.
4. H. S. Seddeq, "Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials," *Australian journal of basic and applied sciences*, vol. 3, no. 4, pp. 4610–4617, 2009.
5. M. Caniato, L. Cozzarini, C. Schmid, and A. Gasparella, "Acoustic and thermal characterization of a novel sustainable material incorporating recycled microplastic waste," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 28, pp. 1–12, 2021.

6. S. Geravandi et al., "Noise pollution and health effects," *Jundishapur Journal of Health Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 1-5, 2015.
7. T. Münzel, M. Sørensen, and A. Daiber, "Transportation noise pollution and cardiovascular disease," *Nature Reviews Cardiology*, vol. 18, no. 9, pp. 619–636, 2021.
8. Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System, *ASTM E1050-12*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, Nov. 13, 2019.
9. Acoustics - Determination of acoustic properties in impedance tubes - Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance (ISO 10534-2:2023), *UNE-EN ISO 10534-2:2024*, Asociación Española de Normalización, Madrid, Spain, April, 2024.
10. N. Hiremath, V. Kumar, N. Motahari, and D. Shukla, "An Overview of Acoustic Impedance Measurement Techniques and Future Prospects," *Metrology*, vol. 1, no. 1, pp. 17–38, 2021.
11. S. Bousshine, M. Ouakarrouch, A. Bybi, N. Laaroussi, M. Garoum, and A. Tilioua, "Acoustical and thermal characterization of sustainable materials derived from vegetable, agricultural, and animal fibers," *Applied Acoustics*, vol. 187, p. 108520, 2022.
12. X. Liu, X. Xiong, J. Pang, L. Wu, and H. Zhang, "Airflow resistivity measurement and sound absorption performance analysis of sound-absorb cotton," *Applied Acoustics*, vol. 179, p. 108060, 2021.