

FILTRO DIGITAL DE LOS COEFICIENTES ACÚSTICOS EN MATERIALES SÓLIDOS EN UN TUBO DE IMPEDANCIA CON DOS CÁMARAS ACÚSTICAS

*DIGITAL FILTER OF ACOUSTIC COEFFICIENTS IN SOLID
MATERIALS IN AN IMPEDANCE TUBE WITH TWO ACOUSTIC
CHAMBERS*

Rosnely Cruz Cecilio

Universidad Autónoma Metropolitana
ross.nely@gmail.com

Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón

Universidad Autónoma Metropolitana
ervc@azc.uam.mx

Laura Angélica Lancón Rivera

Universidad Autónoma Metropolitana
lalr@azc.uam.mx

Resumen

Este trabajo consideró como referencia la técnica del tubo de impedancia para determinar el coeficiente de absorción, en términos de los coeficientes de reflexión y transmisión, cuando una onda acústica de frecuencia variable y amplitud constante incide sobre un material de prueba. El prototipo utilizó un tubo de Policloruro de Vinilo confinando una o dos cámaras acústicas acopladas por una pieza de Nylamid, la cual a su vez se utilizó como portamuestras. Un amplificador Lock-In registró la Función de Transferencia, 600 a 8 kHz, la cual se relacionó con los coeficientes acústicos del material. El coeficiente de absorción obtenido para un material de referencia de Espuma de Poliuretano muestra una adecuada aproximación con los reportados para dos diferentes espesores. Un filtro de promedio móvil eliminó las oscilaciones por la superposición de ondas acústicas en un tubo corto. Cuatro materiales de prueba fueron caracterizados en base a su respuesta acústica.

Palabras Claves: Absorción, transmisión, tubo de impedancia, reflexión.

Abstract

This work makes reference to the impedance tube technique for determining the absorption coefficient, in terms of the reflection and transmission coefficients, when an acoustic wave of variable frequency and constant amplitude strikes on a test material. The prototype used a polyvinyl chloride tube containing one or two acoustic chambers coupled by a piece of Nylamid, which in turn was used as a sample holder. A Lock-In amplifier recorded the Transfer Function, 600 at 8 kHz, which was related to the acoustic coefficients of the material. The absorption coefficient obtained for a polyurethane foam reference material shows an adequate approximation with those reported for two different thicknesses. A moving average filter eliminated the oscillations by the superposition of acoustic waves in a short tube. Four test materials were characterized based on their acoustic response.

Keywords: *Absorption, impedance tube, reflection, transmission.*

1. Introducción

La creación de diversos materiales ha enfocado distintos campos de aplicación en la ingeniería, proponiendo soluciones en términos de la respuesta a un estímulo térmico, eléctrico, mecánico, corrosivo, entre otros. Las diferentes técnicas empleadas para llevar a cabo la caracterización de un material deben cumplir con estándares que garantizan repetitividad y validan los resultados obtenidos a través de un protocolo establecido. Una de las características que ha tomado relativa importancia hoy en día se basa en cuantificar la respuesta de un material a un estímulo acústico. En otras palabras, determinar la respuesta acústica de un material, de manera no invasiva, cuantifica la magnitud de presión sonora reflejada (P_r), transmitida (P_t) y absorbida (α). La figura 1 muestra el efecto producido cuando una presión acústica incidente (P_i) impacta un material de prueba.

El conocer la magnitud de presión de cada onda acústica cuantifica los coeficientes de reflexión (R) y transmisión (T), en términos de la onda incidente, como se describe en las ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$R = \frac{P_r}{P_i} \quad (1)$$

$$T = \frac{P_t}{P_i} \quad (2)$$

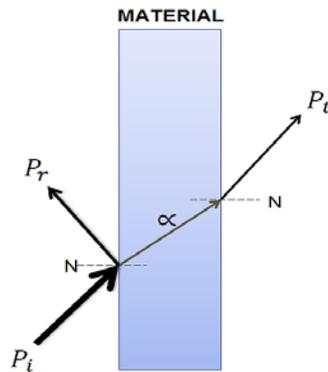


Figura 1 Representación esquemática de las presiones acústicas.

Los parámetros anteriores son utilizados para determinar el coeficiente de absorción (α), dado por la ecuación 3.

$$\alpha = 1 - |R|^2 - |T|^2 \quad (3)$$

La relevancia de este parámetro se usa en la acústica arquitectónica, la cual es una de las áreas que emplea diversos métodos y modelos para comprender el comportamiento del sonido y su interacción con el espacio arquitectónico y urbano. En este sentido, la contaminación acústica en espacios urbanos generada por fuentes de ruido (tránsito vehicular, industrias, negocios, escuelas, centros de diversión, etc.), se ha convertido en un problema de salud, principalmente en las grandes ciudades. Se han realizado diversos estudios en los cuales se ha determinado que, cuando estos niveles de ruido sobrepasan los 60 dB puede afectar el rendimiento del individuo y por consecuencia su calidad de vida [Oshima, 2014] y [Molerón, 2013]. De aquí que, las propiedades acústicas de un material son fundamentales para conocer las magnitudes de presión sonora que se reflejan, transmiten y absorben, cuando una onda acústica incidente impacta un material sólido.

El método experimental más conocido para obtener las propiedades acústicas de un material de prueba es el tubo de impedancia [Feng, 2013]. Este es utilizado

para caracterizar muestras pequeñas de materiales sólidos. El método consta de una bocina colocada en uno de los extremos del tubo, la cual genera una onda acústica que se propaga a través del tubo liso y rígido, que se usa como guía de onda, para impactar un material de prueba colocado en el otro extremo del tubo cerrado. Dos micrófonos sobre la pared interna del tubo, son utilizados para registrar las señales acústicas generadas, las cuales son procesadas para determinar los coeficientes acústicos [Lancón, 2012], [Navacerrada, 2008] y [Castañeda, 2004].

Diferentes versiones del tubo de impedancia se han desarrollado para determinar la respuesta acústica de un material de prueba. El método de la Función de Transferencia (FT) compara la respuesta registrada en dos puntos diferentes para determinar el coeficiente de reflexión y transmisión en función de la frecuencia.

2. Métodos

El diseño de un tubo de impedancia se basa principalmente en los parámetros físicos del tubo y en el ancho de banda de la instrumentación utilizada. Las normas ASTM C384-04, ASTM E1050-12 e ISO 10534-2 establecen el rango de frecuencia (f_{max}), definido por la ecuación 4, que puede ser utilizado en las ondas acústicas, así como la distancia que existe entre ambos micrófonos (s) y la distancia entre el material de prueba y el micrófono más cercano al material de prueba (l'), establecidos por las ecuaciones 5 y 6, respectivamente.

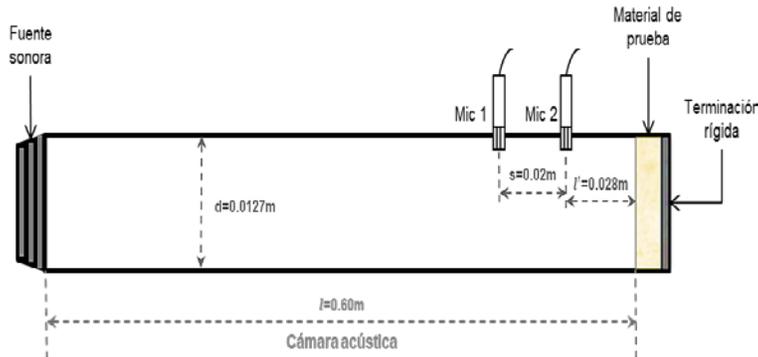
$$f_{max} = \frac{0.1 c}{2 \pi s} \quad (4)$$

$$s = \frac{0.8 c}{2 f_{max}} \quad (5)$$

$$l' = 2 d \quad (6)$$

Donde c es la velocidad del sonido a temperatura ambiente, 345 m/s. Estos parámetros se utilizaron para construir un primer prototipo, el cual cuenta con una sola cámara acústica, como se muestra en la figura 2. Se caracteriza por una terminación cerrada en el respaldo del material de prueba.

A pesar de que el diseño del tubo considera el uso de frecuencias relativamente bajas, la respuesta de la bocina establece una frecuencia mínima de 600 Hz y los parámetros físicos del tubo una frecuencia máxima de 8 kHz.



a) Diseño.



b) construcción.

Figura 2 Tubo de impedancia con una cámara acústica.

El diagrama esquemático de la figura 3 muestra la conexión del sistema experimental. Un amplificador Lock-In es utilizado para generar una señal sinusoidal de frecuencia variable y de amplitud constante (Chirp). El barrido de frecuencia se lleva a cabo en 100 segundos. La señal eléctrica se hace pasar por un amplificador de audio para incrementar la potencia de la señal, antes de hacerla llegar a la bocina. La ganancia es cuidadosamente seleccionada para evitar distorsión y saturación en el registro de las señales acústicas. La señal acústica registrada por cada micrófono es amplificada, antes de hacerla llegar al amplificador Lock-In. Las respuestas en frecuencia p_1 y p_2 se obtienen mediante una comparación entre la señal de referencia generada por el amplificador Lock-In y la respectiva señal registrada por cada micrófono [Song, 2000].

En general, la Función de Transferencia (FT) acústica se define como la relación de las respuestas en frecuencia, representada por la ecuación 7.

$$H_{ij} = \frac{P_j}{P_i} \quad (7)$$

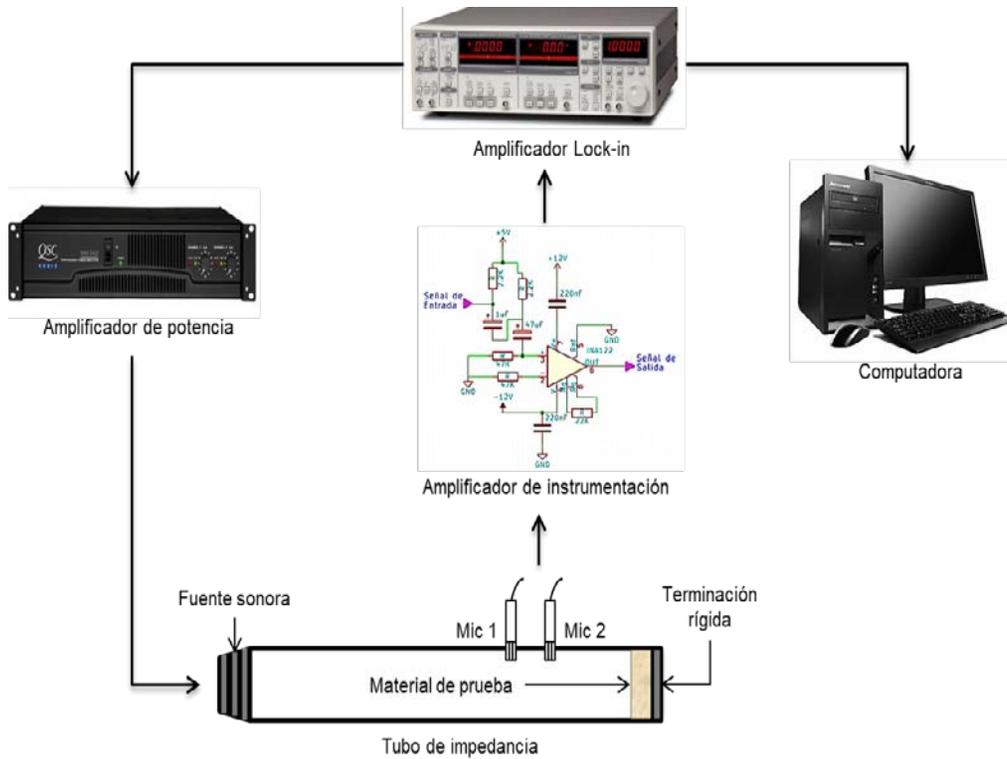


Figura 3 Montaje experimental del tubo de impedancia.

Donde los subíndices i y j corresponden a las respuestas en frecuencia de los micrófonos posicionados a lo largo de la cámara acústica. Por otro lado, es necesario tomar en cuenta que, debido a la corta longitud de la cámara acústica, las respuestas en frecuencia de cada micrófono registran tanto la onda incidente como la onda reflejada, en función de la distancia. De aquí que la FT se define como la ecuación 8.

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\dot{U}_i e^{-jkx_2} + \dot{U}_r e^{-jkx_2}}{\dot{U}_i e^{-jkx_1} + \dot{U}_r e^{-jkx_1}} \quad (8)$$

La metodología establece entonces una FT para la señal incidente (H_I) y reflejada (H_R), las cuales definen la relación entre las mismas presiones acústicas a diferentes posiciones dadas por las ecuaciones 9 y 10.

$$H_I = \frac{P_i(x_2)}{P_i(x_1)} = \frac{\dot{U} P_i e^{-jkx_2}}{\dot{U} P_i e^{-jkx_1}} \quad (9)$$

$$H_R = \frac{P_r(x_2)}{P_r(x_1)} = \frac{\dot{U} P_r e^{-jkx_2}}{\dot{U} P_r e^{-jkx_1}} \quad (10)$$

Las ecuaciones 8, 9 y 10, se utilizan para definir el coeficiente de reflexión en términos de la FT, el cual es equivalente a la razón de la presión reflejada respecto a la presión incidente, como se muestra en la ecuación 11.

$$|R| = \left| \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} (e^{2jkx_1}) \right| = \left| \frac{\dot{U} P_r}{\dot{U} P_i} \right| \quad (11)$$

El diseño de una sola cámara acústica considera nulo el coeficiente de transmisión, ya que el material se sitúa en el extremo cerrado del tubo [Salissou, 2009], [Salissou, 2010] y [Pérez, 2000]. De aquí que es posible conocer el coeficiente de absorción definido por la ecuación 12.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (12)$$

No obstante, para determinar los coeficientes de reflexión, absorción y transmisión de un material de prueba, es necesario construir un tubo de impedancia que contemple dos cámaras acústicas. El uso de un portamuestras facilitó el sostener el material de prueba y acoplar las dos cámaras acústicas. En este caso, el análisis para determinar la distancia que existe entre los micrófonos de la segunda cámara acústica y el material de prueba, es el mismo que se implementó para la primera cámara acústica. El diseño y construcción del segundo prototipo se muestra en la figura 4. Este diseño utiliza una terminación anecoica cerrada al final de la segunda cámara acústica, para evitar reflexiones de las ondas transmitidas.

El registro de las señales acústicas se realizó de la misma forma que el tubo de impedancia con una cámara acústica. En este caso, además de determinar la FT de la señal reflejada, también se determina la FT de la señal transmitida definida por la ecuación 13.

$$|T| = \left| \frac{H_{34} - H_1}{H_T - H_{34}} (e^{2jkx_4}) \right| = \left| \frac{\dot{U}_t}{\dot{U}_i} \right| \quad (13)$$

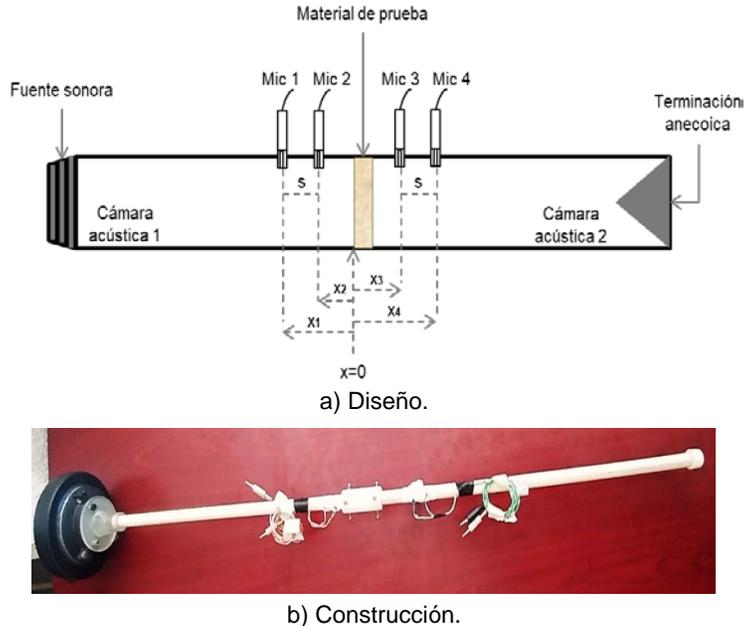


Figura 4 Tubo de impedancia con dos cámaras acústicas acopladas.

Una vez obtenidos el coeficiente de reflexión y transmisión se puede conocer el coeficiente de absorción utilizando la ecuación 3. Cabe mencionar que, el procesamiento de señales consideró un proceso de filtrado de promedio móvil, para eliminar el efecto oscilante en los coeficientes acústicos experimentales generados por la superposición de las ondas en el interior del tubo de impedancia. Es importante mencionar que las mediciones se llevaron a cabo en la cámara semianecoica del Área de Investigación de Análisis y Diseño Acústico de la UAM, Azcapotzalco, para evitar los ruidos ambientales y eléctricos.

3. Resultados

Después de poner en funcionamiento la instrumentación, considerando un tubo de impedancia con una sola cámara acústica, se procedió a definir los parámetros de operación de los amplificadores de potencia y Lock-In, los cuales se describen en la tabla 1.

Tabla 1 Definición de los parámetros de operación.

Instrumentos	Parámetros
Amplificador de potencia, NADY AUDIO XA-900	Ganancia: 3 dB
Amplificador Lock-In, SR-850	Sensitividad: 1 V Constante de tiempo: 300 ms Filtro Db: 24 Sample Rate: 8 Hz Scan Length: 100 s Sine Output: 132 ms Barrido interno: 10-8000 Hz Ref. Phase: 0.00 grados

La puesta en marcha del tubo de impedancia con dos cámaras acústicas y cuatro micrófonos se basó en el mismo montaje experimental descrito en la figura 3. Se realizó un barrido de los 50 Hz a los 10 kHz para evitar transitorios en los límites del rango de operación del tubo de impedancia. Las respuestas en frecuencia fueron seleccionadas en el rango de operación establecido para el respectivo análisis.

La Espuma de Poliuretano se tomó como material de referencia, a partir de que se conocen algunos valores de sus coeficientes de absorción [Flores, 2013]. Se realizaron dos pruebas con dicho material, la primera fue con una muestra que presenta un espesor de 0.015 m y la segunda con 0.035 m de espesor, figura 5.



Figura 5 Espuma de poliuretano de 0.015 m y 0.035 m de espesor.

La figura 6 muestra las magnitudes de los coeficientes de reflexión y transmisión, obtenidos de las ecuaciones 11 y 13, respectivamente, mediante líneas continuas. Las curvas punteadas representan las señales procesadas mediante un filtro de promedio móvil. Como se observa en ambas figuras, la magnitud del coeficiente de reflexión es relativamente mayor que el coeficiente de transmisión, excepto para la frecuencia de 3 kHz, en donde presentan magnitudes similares.

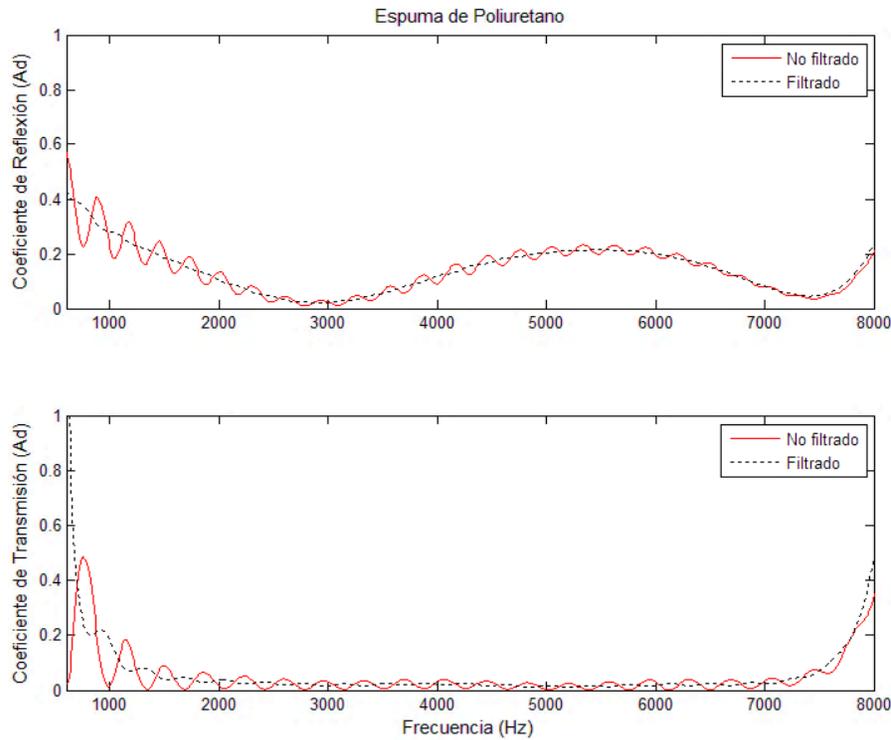


Figura 6 Coeficiente de reflexión y transmisión de espuma de poliuretano (0.015 m).

La respuesta de ambos coeficientes acústicos, en función de la frecuencia, es utilizada para determinar el coeficiente de absorción, utilizando la ecuación 3. La figura 7 muestra una curva continua que representa la magnitud del coeficiente de absorción no filtrado de la Espuma de Poliuretano. La curva punteada representa el coeficiente de absorción filtrado. Los valores de referencia a frecuencias específicas fueron superpuestos en esta misma figura, utilizando un asterisco (*) como marcador [Flores, 2013]. Una comparación entre los resultados obtenidos en este trabajo y los tres valores obtenidos en la literatura muestran una aproximación adecuada.

Se realizó una segunda prueba con el mismo material, pero con diferente espesor, 0.035 m. Al igual que la primera prueba se obtuvo la magnitud de los coeficientes de reflexión y transmisión, no filtrados, los cuales se muestran como una línea continua en la figura 8. En este caso, la curva filtrada del coeficiente de reflexión presenta un comportamiento más uniforme y menos oscilante en comparación al espesor de 0.015 m (figura 6).

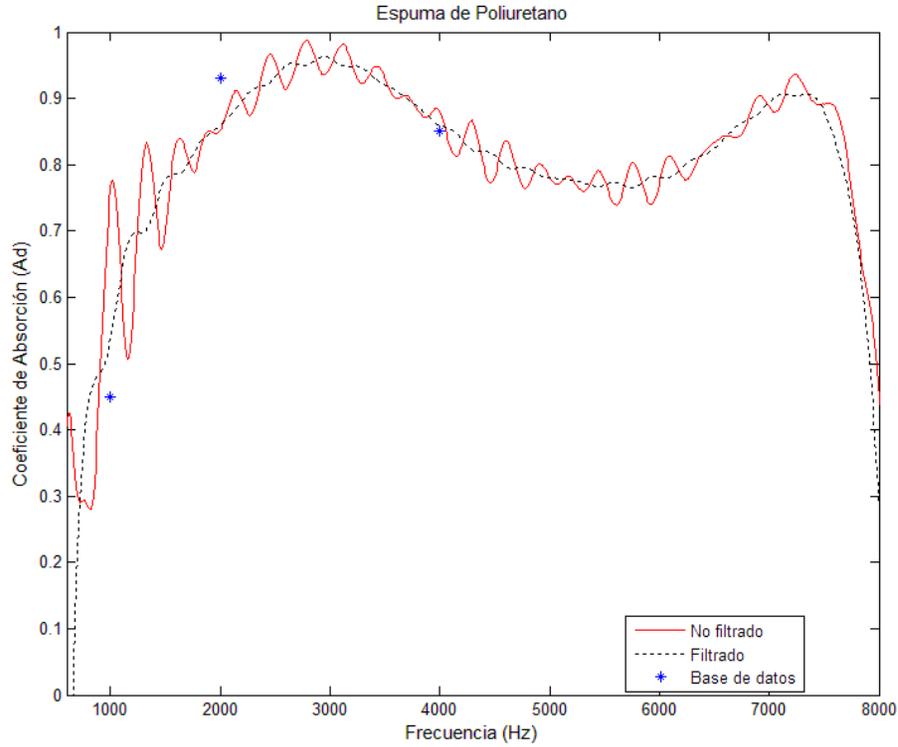


Figura 7 Coeficiente de absorción y transmisión, obtenida por la FT, y los tres valores obtenidos de una base de datos para 1, 2 y 4 kHz [Flores, 2013].

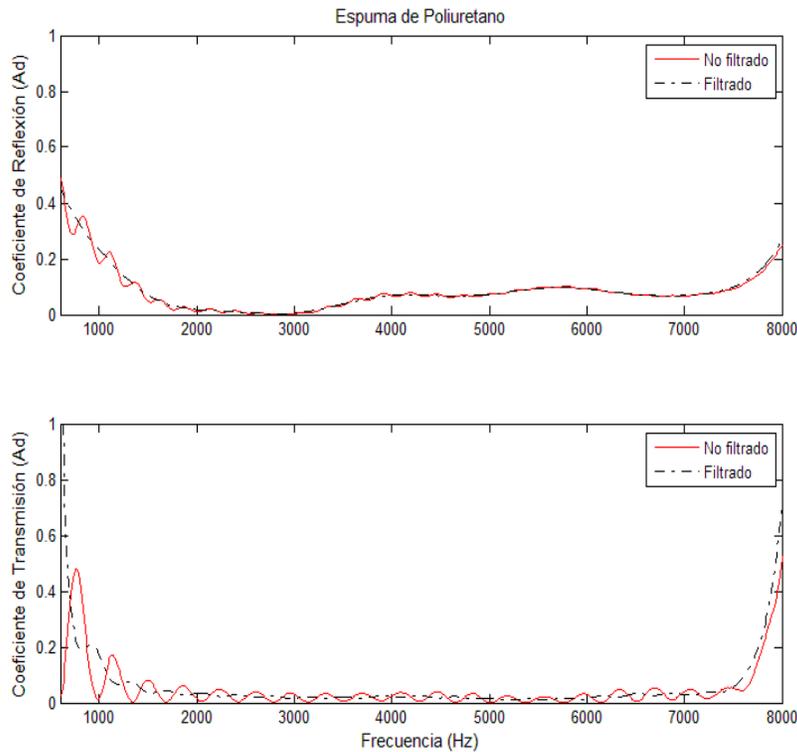


Figura 8 Coeficiente de reflexión y transmisión de la espuma de poliuretano (0.035 m).

La figura 9 muestra las curvas del coeficiente de absorción, filtrada y no filtrada, las cuales fueron obtenidas a partir de sus respectivos coeficientes de reflexión y transmisión del material de prueba. Como en el caso anterior se sobreponen los valores de referencia reportados en la literatura, los cuales se identifican con un asterisco (*) [Flores, 2013].

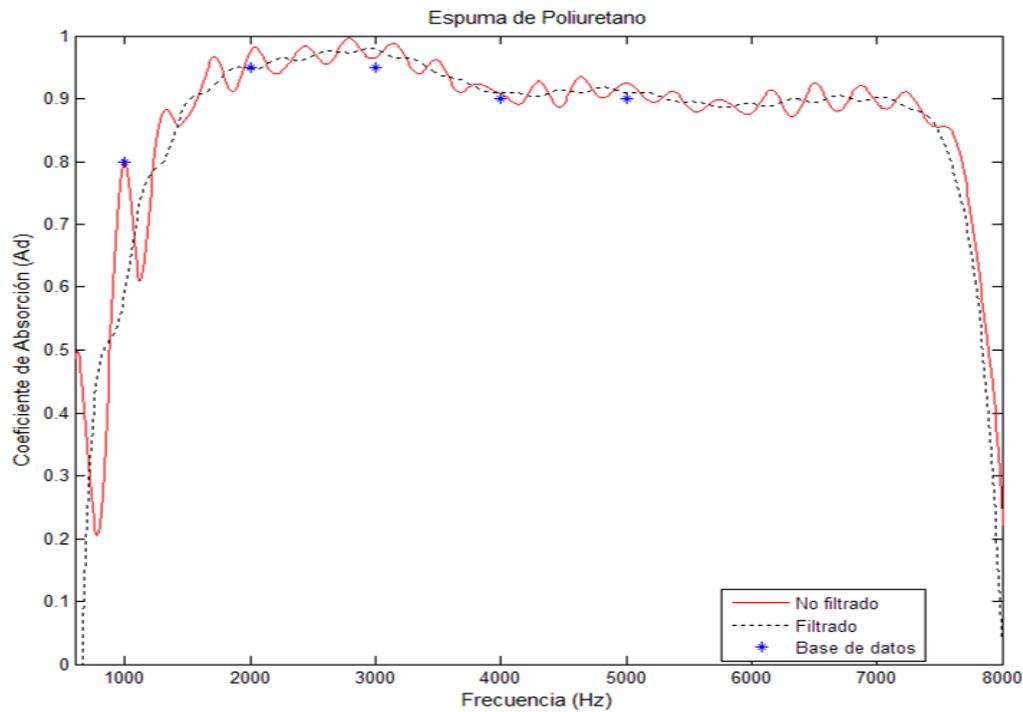


Figura 9 Coeficiente de absorción y transmisión, obtenida por la FT, y los tres valores obtenidos de una base de datos para 1, 2, 3, 4 y 5 kHz [Flores, 2013].

Puesto que, el contraste de la curva filtrada y los valores ya reportados son muy similares, se procedió a realizar la caracterización acústica para otros materiales de prueba: Acrílico, Cartón Comprimido y Madera Balsa, con espesores de 0.003 m, 0.003 m y 0.004 m, respectivamente, figura 10.

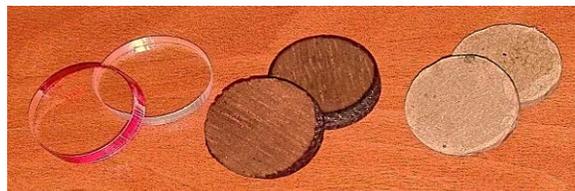


Figura 10 Fotografía del acrílico, de la madera balsa y el cartón comprimido.

En la figura 11 se contrastaron las curvas de los coeficientes acústicos filtrados de estos materiales. Las curvas del coeficiente de reflexión mantienen un comportamiento relativamente constante, es decir, sus magnitudes presentan una magnitud absoluta alrededor del valor de 0.6. El comportamiento de los coeficientes de transmisión para los tres materiales es muy similar y presentan una magnitud pequeña. Mientras que, las curvas del coeficiente de reflexión presentan magnitudes inferiores a 0.4.

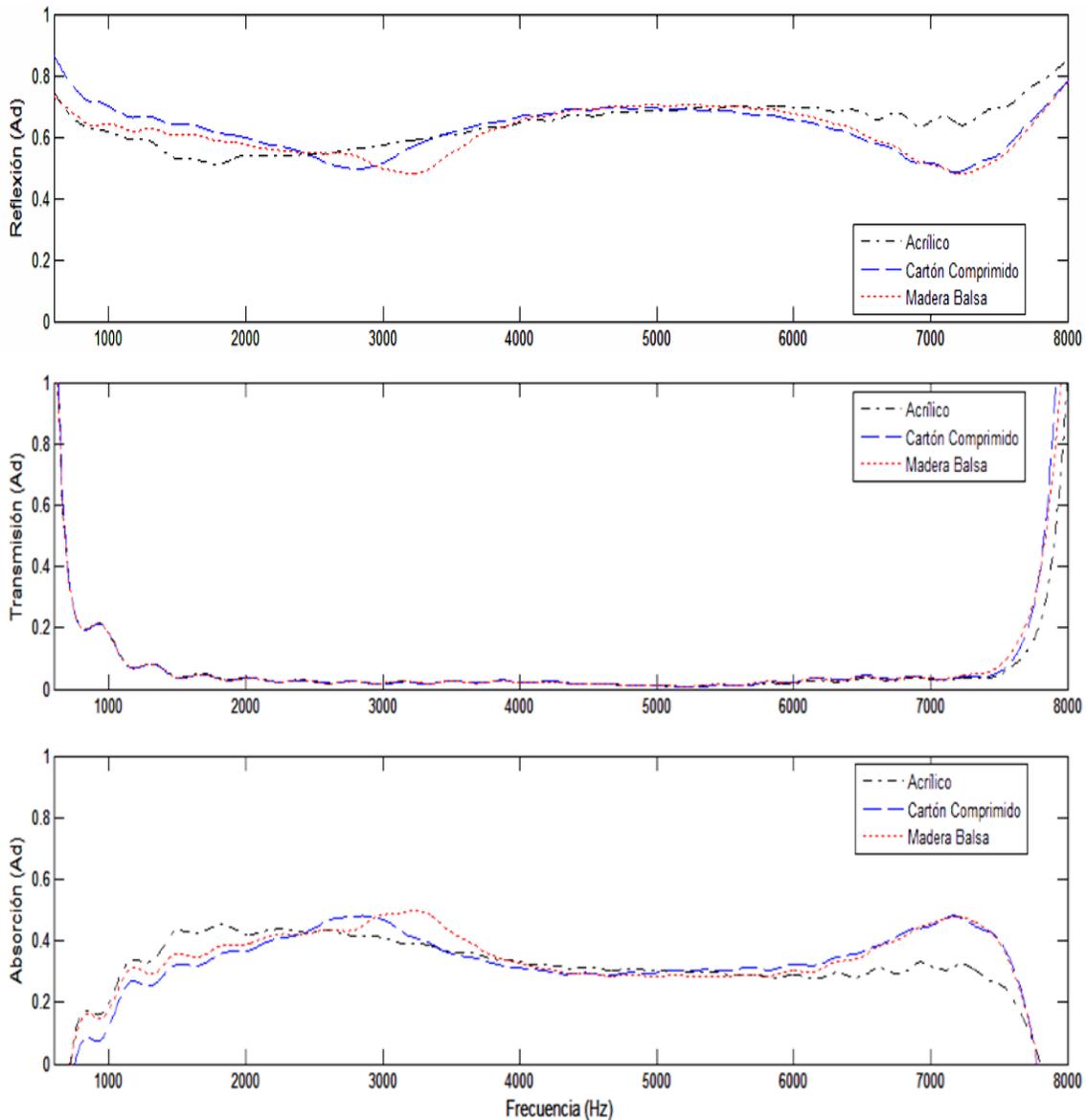


Figura 11 Coeficiente acústicos del acrílico, cartón comprimido y madera balsa.

4. Discusión

El diseño y construcción de un primer prototipo del tubo de impedancia con una cámara acústica establecieron los parámetros y modo de operación de la instrumentación implementada, así como un adecuado manejo en la metodología experimental para tomar en cuenta ciertos factores en la instrumentación y equipo. La ganancia en los amplificadores de instrumentación y de potencia es un factor fundamental en la caracterización acústica para evitar saturación de las ondas acústicas a bajas frecuencias y mantener una alta relación señal a ruido en las altas frecuencias. Las condiciones de operación de una cámara semianecoica mantienen un relativo control para reducir los factores de ruido ambiental y eléctrico durante la caracterización acústica de un material de prueba. El adecuado acoplamiento entre las cámaras acústicas evita cambios de impedancia acústica ocasionados por fugas de sonido. Los resultados obtenidos para un material sólido de referencia, mediante la filtración previa, muestran una adecuada aproximación a los reportados en la literatura. De aquí que la metodología aplicada a un segundo prototipo, constituido por dos cámaras acústicas y acopladas por un portamuestras, cuantificaron el coeficiente de absorción, en términos del coeficiente de reflexión y transmisión. A pesar de que el análisis cualitativo contempla un tubo corto en el cual se tiene una separación pequeña entre micrófonos, el material de prueba y la fuente sonora, los resultados experimentales obtenidos muestran una oscilación de los coeficientes acústicos, la cual es reducida al implementar un filtro de promedio móvil. La clasificación de los materiales de prueba se basa entonces en uno de los coeficientes acústicos para referirlo como reflejante o absorbente, ya que el coeficiente de transmisión resulta ser relativamente bajo. Con estos coeficientes experimentales se puede decir que, la Espuma de Poliuretano es un material absorbente, mientras que el Acrílico, Cartón Comprimido y Madera Balsa se consideran como materiales reflejantes.

5. Conclusiones

La flexibilidad del prototipo construido utiliza una o dos cámaras acústicas para colocar materiales sólidos de prueba con un espesor de hasta 0.035 m y obtener

sus coeficientes acústicos en un rango de 600 Hz a 8 kHz, a través de la Función de Transferencia. Para ello es necesario contar con las condiciones de aislamiento adecuadas, evitando contenidos de frecuencia no deseados por las condiciones externas ambientales, así como un manejo adecuado en los parámetros de la señal para evitar saturación. En este caso debido a la corta longitud del tubo de impedancia, fue necesario implementar un filtro de promedio móvil para representar el comportamiento promedio de los coeficientes acústicos en función de la frecuencia.

La descripción de los coeficientes acústicos permite estimar su aplicación para absorber o reflejar estímulos acústicos con una frecuencia específica. Con ello se podrá llevar a cabo la caracterización acústica de diferentes arreglos de materiales.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] ASTM C384-04(2016) Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method.
- [2] ASTM E1050-12 Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System.
- [3] Castañeda, J.A. y González, H.A. (2004). Medición del coeficiente de absorción del sonido. *Scientia et Technica* Año X, No.25, ISSN:0122-1701.
- [4] Feng, L. (2013). Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials. *Journal Applied Acoustics*, 74, 1480-1485.
- [5] Flores, M.D., Ferreyra, S.P., Cravero, G.A., Budde, L., Longoni, H.C., Ramos, O.A. y Tommasini, F.C. (2013). Base de datos de coeficientes de absorción sonora de diferentes materiales. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, Vol. XXXII, 2901-2908.
- [6] ISO 10534-2 Acoustics, determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes, part 2: Transfer-function method.
- [7] Molerón, M., Félix, S., Pagneux, V, and Richoux, O. (2013). Low frequency acoustic resonances in urban courtyards. *CrossMark*, 4836295.

- [8] Lancón, L. (2012). Caracterizaion de la absorcion sonora en modelos físicos a escala (Maestría en diseño). Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, México, D.F.
- [9] Navacerrada, M.A., Díaz, C., Pedrero, A. y García, L.E. (2008). Acustic propieties of aluminium foams. *Materiales de construccion*, Vol. 58, ISSN: 0465-2746.
- [10] Oshima, T., Ishizuka, T. and Kamijo, T. (2014). Three-dimensional urban acoustic simulations and scale-model measurements over real-life. *JASA Express Letters*, 4879672.
- [11] Pérez, R.S. (2000). Extendiendo las capacidades de medición del tubo de impedancia del centro de instrumentos, UNAM. *Revista Mexicana de Física*, 46(5), 478-484.
- [12] Salissou, Y. and Panneton, R. (2009). A general wave decomposition formula for the measurement of normal incidence sound transmission loss in impedance tube. *Journal of the Acoustic Society of America*, 125 (4), 2083-2090.
- [13] Salissou, Y. and Panneton, R. (2010). Wideband characterization of the complex wave number and characteristic impedance of sound absorbers. *J. Acoust. Soc. Am.* 128 (5), 2868-2876.
- [14] Song, B.H. and Bolton, J.S. (2000). A Tansfer-matrix Approach for Estimating the Characteristic Impedance and Wave Numbers of Limp and Rigid Porous Materials. *Journal Acoustic Soc. Am.*, 107(3), 1131-1151.