

Extendiendo las capacidades de medición del tubo de impedancias del centro de instrumentos, UNAM

Santiago J. Pérez Ruíz

*Sección de Acústica, Centro de Instrumentos, Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México, D.F., Mexico
e-mail: jesper@aleph.cinstrum.unam.mx*

Gilberto Loera Medrano

*División de Vibraciones y Acústica, Centro Nacional de Metrología
Km 4.5 Carretera a los Cués, Querétaro, Mexico
e-mail: gloera@cenam.mx*

Recibido el 3 de noviembre de 1999; aceptado el 5 de junio de 2000

Presentamos los resultados de medir el coeficiente de absorción sonora y la impedancia acústica específica mediante el método de la función de transferencia por 2 micrófonos. En el arreglo de medición se utiliza el mismo tubo de impedancias que usualmente se emplea en el método de determinación de la relación de onda estacionaria. No se utilizaron costosos micrófonos pareados, pero se utilizó un procedimiento de conmutación para eliminar errores de fase. La precisión de las mediciones fue muy satisfactoria.

Descriptores: Mediciones de impedancia; tubo de impedancias

We present the results of measuring the sound absorption coefficient and the specific acoustic impedance through the two-microphone method. In the experimental arrangement is used the same impedances tube that, commonly, is employed in the method of determination of the standing wave ratio. A pair of expensive matched microphones is not used but to eliminate the measurement error due to instrumental phase mismatch, a circuit switching procedure is used. The measurements accuracies were very satisfactory.

Keywords: impedance measurements; impedance tube

PACS: 43.58 B; 43.55 E

1. Introducción

El método usual para medir absorción acústica e impedancia acústica en incidencia normal, es el método de medición de la relación de onda estacionaria (ROE) [1]. Sin embargo, los avances de la instrumentación digital moderna han permitido desarrollar nuevos métodos que superan algunas de las desventajas del método por ROE [2]. En particular el método por medición de la función de transferencia, de la señal de dos micrófonos (FT2M), se ha ido consolidando como el método patrón para medir impedancia [3], por las ventajas que ofrece: rapidez, confiabilidad y buena repetibilidad. Este método también emplea un tubo, como el método por ROE; sin embargo, el principal inconveniente para instrumentarlo radica en el alto costo de los dos micrófonos igualados (con sensibilidad, respuesta en frecuencia y fase iguales), que se requieren.

Por estas razones se decidió investigar la posibilidad de instrumentar el método por la medición de la FT2M con los siguientes objetivos:

- Indagar si es posible tener en un sólo tubo ambos métodos (ROE y FT2M).
- Explorar la posibilidad de utilizar micrófonos no igualados en el método de FT2M.
- Contar con un arreglo experimental versátil.

La viabilidad de este proyecto se vió reforzada por el inicio del programa de inter-comparación de medición de absorción sonora entre la Sección de Acústica del Centro de Instrumentos (CIUNAM) y la División de Vibraciones y Acústica del Centro Nacional de Metrología (DVA-CENAM) [4]. El presente trabajo consigna los resultados encontrados en el tubo de impedancias del CIUNAM.

2. Teoría de operación

2.1. Método ROE

2.1.1. Absorción

El método para medir el coeficiente de absorción α_n (en incidencia normal), midiendo la ROE se basa en lo siguiente: Se produce una onda sonora plana, de cierta frecuencia, dentro del tubo, (con radio d , longitud l), esta onda se refleja por el espécimen bajo medición (material absorbente), colocado en el extremo opuesto de donde se excitó el tubo; a consecuencia de esta reflexión se produce un patrón de ondas estacionarias dentro del tubo, este patrón de ondas estacionarias puede explorarse mediante un micrófono sonda. El coeficiente α_n se determina a partir de la ROE, usualmente medida en decibeles (dB). En la Fig. 1 se muestra una representación esquemática del patrón de ondas estacionarias dentro del tubo,

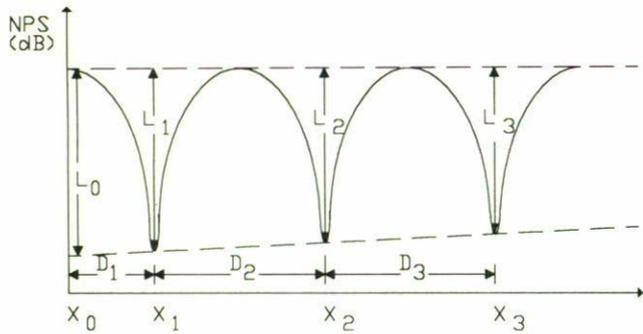


FIGURA 1. Niveles de presión sonora, en decibeles, dentro del tubo.

la curva representa la variación del nivel de presión sonora (NPS) en función de la distancia \$X\$ a partir del espécimen bajo medición.

En los sitios donde la onda incidente y reflejada están en fase, los respectivos NPS, expresados en dB, se suman, localizándose ahí, los antinodos o máximos de NPS de la onda estacionaria. Por el contrario, donde estas ondas están fuera de fase, los niveles se restan, localizándose ahí los nodos o mínimos de NPS de la onda estacionaria, la localización de estos mínimos se representa por \$X_1, X_2, X_3\$, en la Fig. 1. Las diferencias de los niveles máximos y mínimos de NPS representadas por \$L_0, L_1, L_2, L_3\$ en la Fig. 1, definen la ROE a través de

$$ROE = 10^{(L_0/20)} \tag{1}$$

Observe que \$L_0\$ requiere determinar los niveles máximos y mínimos sobre la superficie del material, como esto no es posible lo que se hace es medir \$L_1\$ y \$L_2\$ mediante el micrófono sonda para extrapolar el valor de \$L_0\$ mediante la siguiente expresión:

$$L_0 = L_1 + \frac{L_1 - L_2}{2} \tag{2}$$

Si las envolventes de los niveles máximos y mínimos (\$L_{m\acute{a}x}\$ y \$L_{m\acute{i}n}\$) forman dos rectas paralelas, la aproximación de la Ec. (2) no tendrá error. En este caso podemos determinar el coeficiente de reflexión mediante

$$R = \frac{ROE - 1}{ROE + 1} \tag{3}$$

y, finalmente, obtener \$\alpha_n\$ a través de

$$\alpha_n = 1 - R^2 \tag{4}$$

Cuando las envolventes de los niveles máximos y mínimos (\$L_{m\acute{a}x}\$ y \$L_{m\acute{i}n}\$) no forman dos rectas paralelas, se debe a que existen pérdidas a lo largo del tubo. Es decir, la energía sonora no sólo se pierde por acción de la absorción del material bajo medición, sino que existen otros mecanismos de pérdida. Esto significa que existe cierta atenuación de los niveles en función de la distancia. Una manera de disminuir este efecto es construir el tubo de materiales muy rígidos

y masivos. Si pese a esto, existe cierta atenuación, la interpolación lineal de la Ec. (2), se puede reemplazar por otro tipo de interpolación no lineal que refleje la curvatura de las envolventes. El efecto de la atenuación es más marcado en la envolvente de \$L_{m\acute{i}n}\$ que en la de \$L_{m\acute{a}x}\$, como se ilustra en la Fig. 1. Es factible que la medición del nivel mínimo se vea obstaculizado por el nivel de ruido de fondo. Esto constituye una limitante en este método de medición.

Ahora es claro, el porqué determinar la ROE sólo con un \$L_1\$, es una mala estrategia. Por esta razón la norma correspondiente [1] recomienda medir por lo menos dos mínimos y un máximo para disponer de al menos \$L_1\$ y \$L_2\$ para determinar la ROE. En consecuencia, el tubo deberá tener una longitud suficiente como para contener el patrón de onda estacionaria necesario para la medición, es decir, debe tener la longitud necesaria para poder medir un máximo y al menos dos mínimos. La relación entre la longitud de onda y la longitud útil del tubo, cuando se desea contener dos mínimos puede expresarse como sigue:

$$\frac{3}{4}\lambda < l - d \quad \text{ó} \quad \frac{3}{4}\left(\frac{c}{f_{m\acute{i}n}}\right) < l - d, \tag{5}$$

donde \$\lambda\$ es la longitud de onda, a una frecuencia dada (m); \$l\$ la longitud del tubo (m); \$d\$ el diámetro del tubo (m) y \$f_{m\acute{i}n}\$ la frecuencia mínima de medición (Hertz).

Esto quiere decir que si se tiene un tubo de 1 metro de longitud y 10 centímetros de diámetro, considerando una velocidad del sonido igual a 340 m/s, la frecuencia debe ser mayor a 283 Hertz si se desea medir dos mínimos por lo menos. Esto constituye otra limitante en este método, pues si se desea medir \$\alpha_n\$ en frecuencias muy bajas el tubo deberá ser muy largo.

En el otro extremo de frecuencia, debe considerarse que el principio de medición requiere que las ondas incidentes y reflejadas sean ondas planas, es decir que no existan modos cruzados, para garantizar esto la frecuencia deberá ser menor a (para un tubo circular)

$$f_{m\acute{a}x} < 0.586 \frac{c}{d}, \tag{6}$$

donde \$c\$ es la velocidad del sonido (m/s); \$d\$ el diámetro del tubo (m) y \$f_{m\acute{a}x}\$ la frecuencia máxima de medición (Hertz).

Esto significa que la gama de frecuencias de medición de \$\alpha_n\$ en este método (para ciertas dimensiones del tubo) está comprendida entre \$f_{m\acute{i}n}\$ y \$f_{m\acute{a}x}\$.

2.1.2. Impedancia acústica específica

La medición de la impedancia acústica específica (en incidencia normal) se determina mediante las relaciones definidas por

$$\frac{z}{\rho c} = \frac{r}{\rho c} + j \frac{x}{\rho c} \tag{7}$$

Es decir, referidas a la impedancia acústica específica del aire \$\rho c\$, por lo que la impedancia definida por Ec. (7) se denomina

como impedancia acústica específica normalizada con r como la resistencia acústica específica normalizada y x como la reactancia acústica específica normalizada. Para determinar estas magnitudes es necesario tanto determinar la ROE como medir las distancias D_1 y D_2 mostradas en la Fig. 1. Con las distancias D_1 y D_2 se determina el ángulo de fase, es decir,

$$\phi = 360^\circ \left[\frac{D_1}{D_2} - \frac{1}{2} \right], \quad (8)$$

y con la ROE se calculan dos números:

$$M = \frac{1}{2} \left[\text{ROE} + \left(\frac{1}{\text{ROE}} \right) \right]$$

y

$$N = \frac{1}{2} \left[\text{ROE} - \left(\frac{1}{\text{ROE}} \right) \right]; \quad (9)$$

para, finalmente,

$$\begin{aligned} \frac{r}{\rho_c} &= \frac{1}{M - N \cos \phi}, \\ \frac{x}{\rho_c} &= \frac{r}{\rho_c} \sin \phi. \end{aligned} \quad (10)$$

Como el ángulo de fase depende de las distancias se debe tener especial cuidado en medir las distancias X_1 , X_2 , X_3 a partir del origen X_0 (la posición de la cara del material a medir). Por lo que la norma correspondiente especifica un proceso de calibración en ese sentido [1].

Tanto el coeficiente de absorción como la impedancia acústica específica normalizada son funciones de la frecuencia; dado que las mediciones se realizan con tonos puros a determinadas frecuencias, el proceso es muy lento cuando se desea conocer el comportamiento de estos parámetros en una gama grande de frecuencias. Esto representa otra limitante en este método de medición.

Es muy útil poner de manifiesto las siguientes relaciones. La superposición de la onda incidente (con amplitud A) y reflejada (con amplitud B), que define el campo sonoro dentro del tubo puede expresarse como

$$p(x, t) = Ae^{j(\omega t + kx)} + Be^{j(\omega t - kx)}. \quad (11)$$

Con el eje de referencia mostrado en la Fig. 1 y k es el número de onda. El valor de la presión cuadrática media se expresa mediante la siguiente expresión:

$$\bar{p}^2 = \frac{1}{2} p \cdot p^*, \quad (12)$$

donde p^* denota complejo conjugado. Utilizando la Ec. (11) podemos obtener

$$\bar{p}^2 = \frac{1}{2} [A^2 + B^2 + 2AB \cos(kx)], \quad (13)$$

que tendrá un valor máximo en

$$\bar{p}_{\text{máx}}^2 = \frac{1}{2} (A^2 + B^2)^2$$

y un mínimo en

$$\bar{p}_{\text{mín}}^2 = \frac{1}{2} (A^2 - B^2)^2;$$

por lo tanto, la ROE se expresaría mediante

$$\frac{\bar{p}_{\text{máx}}^2}{\bar{p}_{\text{mín}}^2} = \frac{(A^2 + B^2)^2}{(A^2 - B^2)^2} = \text{ROE} \quad (14)$$

y la relación con los niveles L (en dB) se establece mediante

$$L = 10 \log \frac{\bar{p}_{\text{máx}}^2}{\bar{p}_{\text{mín}}^2}. \quad (14b)$$

Las características del tubo de impedancias del CIUNAM se consignan en detalle en la Ref. 5.

2.2. Método FT2M

Al igual que el método de la medición de la ROE, el método de dos micrófonos también utiliza un tubo y, del mismo modo, el material a medir se monta en un extremo del tubo y en otro se encuentra la fuente de excitación, sólo que en este caso la señal de excitación es ruido aleatorio. La medición de n se obtiene a partir de la función de transferencia (H) entre las señales de dos micrófonos colocados en la pared del tubo. La función de transferencia representa físicamente la relación de la transformada de Fourier de la presión sonora en la localización de los dos micrófonos.

El campo sonoro dentro del tubo puede expresarse como

$$P(x, \omega) = P_+(\omega)e^{-jkx} + P_-(\omega)e^{jkx}. \quad (15)$$

Que representa la transformada de Fourier de la Ec. (7), donde P_- representa la presión incidente y P_+ la presión reflejada. Para dos posiciones, separadas un cierta distancia s , tendríamos

$$\begin{aligned} P_1(\omega) &= P_+(\omega) + P_-(\omega), \\ P_2(\omega) &= P_+(\omega)e^{-jks} + P_-(\omega)e^{jks}. \end{aligned} \quad (16)$$

Tanto en la Ec. (15) como en la Ec. (16) se ha considerado que no existe flujo y, de momento, se ignoran los efectos de atenuación. El coeficiente de reflexión es la razón entre la presión incidente y la reflejada, es decir,

$$R(\omega) = \frac{P_-(\omega)}{P_+(\omega)}. \quad (17)$$

En esta relación estamos asumiendo que el tubo en una dirección se puede considerar como un sistema acústico pasivo lineal y que existe una relación lineal entre P_+ y P_- , por lo tanto, la presión entre los dos puntos de medición puede expresarse mediante una función de transferencia, es decir, tener

$$H_{12}(\omega) = \frac{P_2}{P_1}. \quad (18)$$

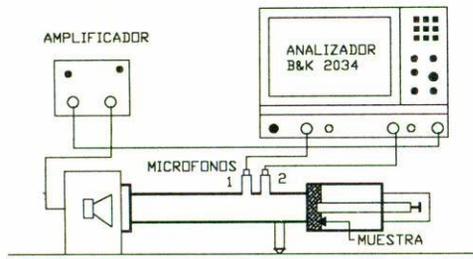


FIGURA 2. Arreglo experimental.

Combinando las Ecs. (16), (17) y (18) tendremos [6, 7]

$$R(\omega) = \frac{H_{12}(\omega) - e^{(-jks)}}{e^{(jks)} - H_{12}(\omega)}. \quad (19)$$

Y mediante la Ec. (4), finalmente, se determina el coeficiente de absorción α_n .

La resistencia acústica específica normalizada puede calcularse mediante

$$\frac{r}{\rho c} = \frac{\alpha_n}{2(1 - R_r) - \alpha_n}, \quad (20)$$

y la reactancia acústica específica normalizada a través de

$$\frac{x}{\rho c} = \frac{2R_i}{2(1 - R_r) - \alpha_n}, \quad (21)$$

donde R_r y R_i son, respectivamente, la parte real e imaginaria del coeficiente de reflexión definido por Ec. (19).

3. Procedimientos e instrumentación

Para instrumentar el método FT2M en el mismo tubo del CIUNAM se realizaron perforaciones para colocar los micrófonos, en la Fig. 2 se muestra un esquema como se dispuso el arreglo experimental. El analizador y amplificador es marca Brüel & Kaer (B&K). En este esquema no se muestra el carro del micrófono-sonda necesario en la determinación de la ROE. Para elegir tanto la distancia s entre micrófonos, como su posición con relación a la posición a la fuente o a la muestra, nos basamos en el análisis de errores establecido en la Ref. 7. En dicho trabajo se establece que la longitud del tubo sea pequeña, más concretamente $L \sim 5-10$ veces el diámetro del tubo; en nuestro caso [5] tenemos un diámetro del tubo de 10.2 cm y una longitud útil de 105.5 cm. Lo cual nos sitúa ligeramente fuera de la recomendación; sin embargo, ya que la intención inicial de este proyecto era no modificar el tubo sino cuantificar el error introducido en la medición por utilizar la longitud actual del tubo, se decidió no modificar esta longitud.

Adicionalmente, la posición del micrófono 1, debe colocarse cerca, tanto como sea posible, del extremo donde este colocada la muestra a medir, aunque según la Ref. 6 no debe acercarse demasiado a la superficie de la muestra para evitar el efecto del campo cercano; una distancia límite de un diá-

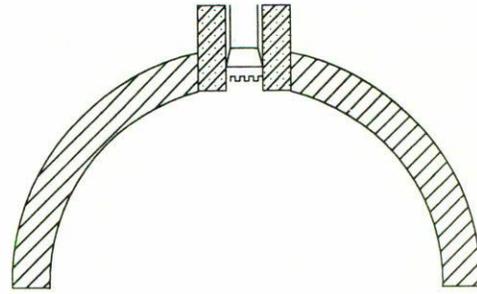


FIGURA 3. Colocación de los micrófonos dentro del tubo.

metro del tubo parece un criterio razonable para colocar el micrófono más cercano a la muestra [2] (micrófono 2 de la Fig. 2).

La separación s entre micrófonos, define el límite superior de la frecuencia máxima de medición [2]; sin embargo, de acuerdo al análisis de errores de la Ref. 7, en una separación menor a 5 cm los errores por longitud quedarían dominantes, por lo que una separación de 5 cm. o más sería buena alternativa. De cualquier modo existe el compromiso entre separación y frecuencia máxima y mínima de interés, de acuerdo a la Ref. 7 se sabe que la gama de menor sensibilidad a errores está definida por

$$ks = \frac{\pi}{2}, \quad (22)$$

por lo que para evitar una gran sensibilidad a los errores en los datos de entrada, el método será aplicable en la gama definida por

$$0.1\pi < ks < 0.8\pi, \quad (23)$$

los cuales definen las siguientes cotas:

$$f_{\min} > \frac{0.1c}{2s} \quad \text{y} \quad f_{\max} < \frac{0.8c}{2s}. \quad (24)$$

Las distancias consideradas en este estudio son: la distancia del micrófono 2 a la muestra, que fue de 10 cm; la distancia s (separación entre micrófonos) que fue de 5 cm, por lo que la gama de medición válida es de f_{\min} de 340 y f_{\max} de 2752. Sin embargo, al ancho de banda del analizador utilizado sólo es posible elegir entre 1600 y 3200, por lo que el análisis se pensó hasta 1600 Hertz. Esta elección permite comparar nuestros resultados con el sistema de la DVA-CENAM, casi en la misma gama de frecuencia. Las posiciones para los micrófonos se hicieron perforando el tubo y colocando una pieza maquinada que sujeta el cuerpo del preamplificador de los micrófonos utilizados (B&K 4135 de 1/8 de pulgada de diámetro). En la Fig. 3 se muestra el esquema del montaje de los micrófonos.

3.1. Procedimiento de calibración

Puesto que la función de transferencia es una relación compleja de las respuestas de presión de los dispositivos que sensan la presión sonora, cualquier diferencia en la respuesta de

amplitud y fase de los dos sistemas de micrófonos afectan la exactitud de la función de transferencia medida [2]. Por esta razón, es recomendable utilizar un par de micrófonos pareados (o igualados), que por esta característica son de costo elevado. En el presente trabajo se utilizaron micrófonos no igualados, aunque de características semejantes y se utilizó el siguiente procedimiento de calibración para minimizar los errores debidos a su desigualdad.

Con la muestra colocada, o con otra muestra absorbente, se mide la función de transferencia con el analizador, de esta forma se obtiene

$$H_A(f) = |H_A(f)|e^{j\phi_A(f)}. \tag{25}$$

Se intercambia la posición de los micrófonos, cuidando que al intercambiar los micrófonos se asegure que el micrófono 1 en la configuración B ocupe la localización exacta que el micrófono 2 ocupó en la posición A, se vuelve a medir la función de transferencia y se obtiene

$$H_B(f) = |H_B(f)|e^{j\phi_B(f)}. \tag{26}$$

Se calcula el factor de calibración de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$|H_C(f)| = \sqrt{|H_A(f)| \cdot |H_B(f)|}, \tag{27}$$

$$\phi_C(f) = \frac{\phi^A(f) + \phi^B(f)}{2}. \tag{28}$$

Para la medición se vuelven a colocar los micrófonos en la primera posición y se realiza la medición definitiva, en este caso se obtiene

$$\tilde{H}(f) = |\tilde{H}(f)|e^{j\tilde{\phi}(f)}. \tag{29}$$

Finalmente, la medición corregida es

$$|H(f)| = \frac{|\tilde{H}(f)|}{|H_C(f)|},$$

$$\phi(f) = \tilde{\phi}(f) - \phi_C(f). \tag{30}$$

Para medir se utilizó un material de prueba (Sonex de 1 pulgada), que se había venido utilizando en el ejercicio de intercomparación con el DVA-CENAM [4]. El sistema de medición del DVA-CENAM consiste en un sistema automatizado B&K 4206 con micrófonos igualados y, constituye para estas mediciones, un sistema patrón de referencia. El sistema utilizado en el CIUNAM comprende lo mostrado en la Fig. 2, más un termómetro de carátula; además de una computadora personal, una interfaz IEEE-488, y un programa de transferencia de datos desarrollados en el CIUNAM en Lenguaje C. Finalmente todos los cálculos necesarios se desarrollaron en MATLAB [8].

4. Resultados

Las mediciones se planearon, esencialmente, para demostrar la viabilidad del método de FT2M en tema del CIUNAM.

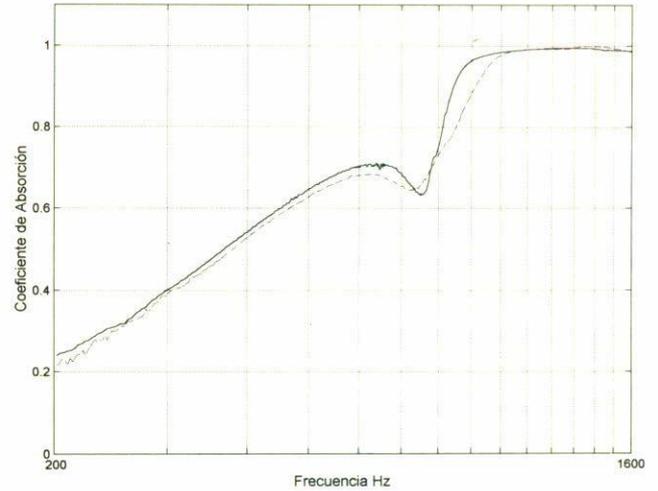


FIGURA 4. Coeficiente de absorción. Línea punteada DVA-CENAM; línea continua CIUNAM.

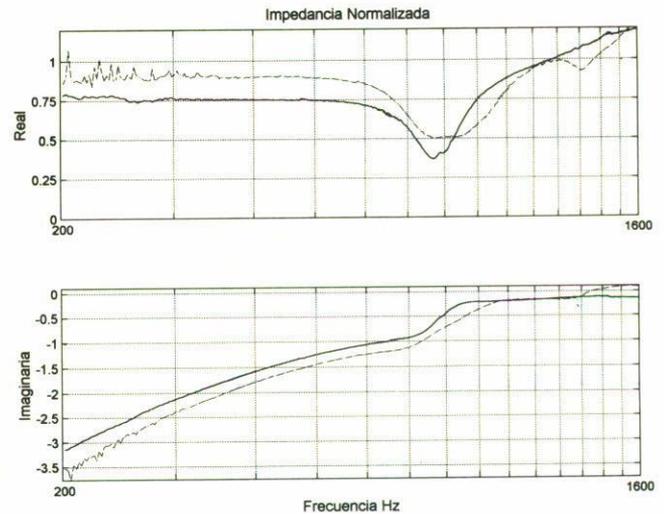


FIGURA 5. Impedancia acústica específica. Línea punteada DVA-CENAM; línea continua CIUNAM

Por lo tanto, la mayoría de resultados presentados aquí son con relación al método de FT2M y considerando, como ya se había mencionado, al sistema de medición del DVA-CENAM como patrón de referencia. Como el método de medición se basa en determinar la función de transferencia, se cuidaron las recomendaciones de lograr un valor alto de coherencia entre las señales de los dos micrófonos [9]. En la Fig. 4, se comparan las curvas del coeficiente de absorción, medidos en el tubo de impedancias del CIUNAM, y con el sistema de referencia (DVA-CENAM). Como puede observarse los valores del coeficiente son semejantes en la gama válida de frecuencias de medición (~ 300 a 1600 Hz). Así mismo, en la Fig. 5 se muestra la comparación de las mediciones de impedancia acústica específica normalizada de los dos sistemas, igualmente los valores son muy parecidos.

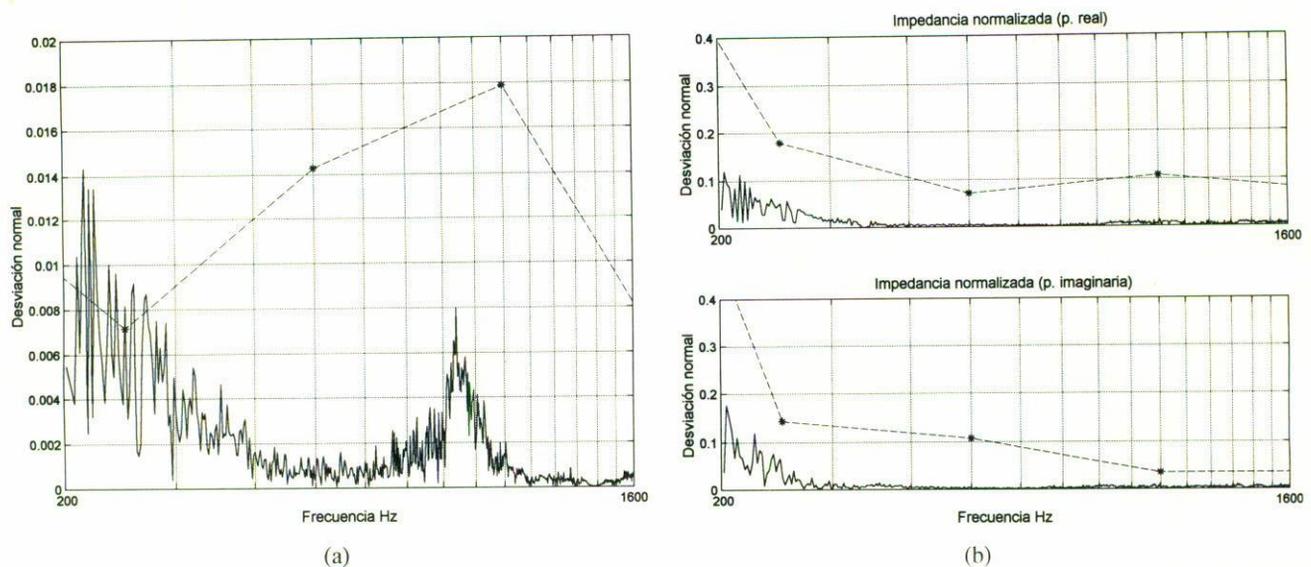


FIGURA 6. Desviaciones normales de repetibilidad. Línea punteada DVA-CENAM; línea continua CIUNAM. Para (a) coeficiente de absorción sonora y (b) impedancia acústica específica normalizada.

Para tener una idea de la precisión de estos resultados, la norma respectiva [2] establece un valor de precisión definido en dos conceptos: reproducibilidad y repetibilidad. Estos conceptos se han adoptado internacionalmente como los más útiles (y suficientes) para determinar la variabilidad de un método de medición [10]. La repetibilidad (r), se refiere a mediciones efectuadas bajo condiciones que pueden considerarse, tanto como sea posible, como constantes, es decir, en un mismo laboratorio, por un mismo operador y con el mismo arreglo experimental. La reproducibilidad (R), se refiere a mediciones efectuadas bajo condiciones variables, diferentes laboratorios, diferentes operadores y diferentes arreglos experimentales. De este modo, la repetibilidad y la reproducibilidad representan dos valores extremos; el primero, r , representa el mínimo y el segundo, R , representa el máximo de la variabilidad en el resultado. En la norma de la Ref. 10 se especifica los procedimientos, detalladamente, para determinar tanto r como R , pero para fines de este trabajo consideramos la siguiente relación:

$$\text{desviación normal de repetibilidad} = r/2.8$$

y

$$\text{desviación normal de reproducibilidad} = R/2.8.$$

De este modo se calculó una desviación normal de repetibilidad para nuestras mediciones, tanto de coeficiente de absorción como para la impedancia acústica específica normalizada, y se compararon con las consignadas en la Ref. 2. Estos resultados se muestran en la Fig. 6. Como puede verse la desviación normal de nuestras mediciones son menores a

las consignadas en la Ref. 2 en la gama válida de frecuencias de medición. Esto no necesariamente quiere decir que nuestros valores de dispersión sean mejores, simplemente indican que los resultados de las mediciones se encuentran en los límites encontrados por otros laboratorios. Para tener una mejor estimación de la precisión es necesario determinar la reproducibilidad (la variabilidad entre distintos laboratorios), pero este trabajo aun se encuentra en curso debido a los requisitos establecidos en la Ref. 9 para realizar una comparación entre laboratorios.

5. Conclusiones

Se comprobó que es factible instrumentar el método de FT2M utilizando un par de micrófonos no pareados; los resultados indican que la variabilidad de la medición alcanzada no es inferior a la alcanzada por otros laboratorios utilizando métodos de medición similares, aunque es necesario estimar la variabilidad entre laboratorios, con los datos que se disponen es posible ser optimista en que esta variabilidad se encuentre entre los valores esperados que diversos laboratorios han consignado.

Así mismo, se instrumentó el método de FT2M para medir coeficiente de absorción e impedancia acústica específica normalizada, empleando el mismo tubo de impedancias donde, previamente, se había desarrollado el método de medición de ROE. De este modo se logró desarrollar un arreglo experimental donde, además de poder comparar dos métodos de medición, se puede ilustrar tanto la física de las ondas sonoras unidimensionales, como los principios de medición basados en análisis espectral y de correlación [9].

1. ASTM C 384-90a, *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method*, (American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990).
2. ASTM E 1050-90, *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System*, (American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990).
3. M.G. Jones and P.E. Stiede, *J. Acoust. Soc. Am.* **101** (1997) 2694.
4. G. Loera M. and S.J. Pérez R., "Comparación preliminar de los coeficientes de absorción sonora en incidencia normal, entre el Centro Nacional de Metrología y el Centro de Instrumentos, UNAM", *IV Congreso Nacional de Acústica*, Septiembre 1998, Querétaro, México.
5. A. Pérez L. Tesis IPN, México, D.F., 1987.
6. J.Y Chung and D.A. Blaser, *J. Acoust. Soc. Am.* **68** (1980) 907.
7. M. bom and H. Bodén, *J. Acoust. Soc. Am.* **79** (1986) 541.
8. *MATLAB. The language of technical computing*, The Mathworks Inc., Massachusetts, (1996).
9. J.S. Bendat and A.G. Piersol, *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, Second edition (John Wiley & Sons, New York, 1993).
10. ISO 5725-1986 (E) Precision of test methods, *Determination of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter-laboratory tests*, (International Organization for Standardization, Switzerland, 1986).