



paper ID: A017 /p.1

## Comparación de los Métodos de Medida del Coeficiente de Absorción en los Dominios de la Frecuencia y del Tiempo

P. Cobo<sup>a</sup> & M. Sigüero<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Acústica, CSIC, Serrano 144. 28006 Madrid, España

<sup>b</sup> Departamento de Comunicación Audiovisual, UCM, Avenida Complutense s/n, 28040 Madrid, ESPAÑA

**RESUMEN:** El coeficiente de absorción de un sistema absorbente acústico se puede medir en el dominio de la frecuencia y del tiempo. En un tubo de ondas estacionarias se mide el coeficiente de absorción de ondas planas en incidencia normal en el dominio de la frecuencia, usando la norma ISO 10434-2. Para caracterizar sistemas absorbentes in situ, sin embargo, se usa la norma CEN/TS 1793-5, que emplea las señales directa y reflejada medidas en el dominio del tiempo en incidencia oblicua. Se asume que la medida del coeficiente de absorción en el dominio del tiempo, en incidencia normal, debe coincidir con la medida del coeficiente de absorción en el dominio de la frecuencia en un tubo de ondas estacionarias. Sin embargo, esto no ha sido demostrado formalmente todavía. En este trabajo se lleva a cabo esta comparación. Se usa el modelo convolucional para reproducir la respuesta impulsiva de un sistema absorbente (un MIU en este caso) a partir de los coeficientes de reflexión y transmisión en una interfaz aire-MIU-aire. La convolución de esta respuesta impulsiva con la señal directa altavoz-micrófono nos permite obtener la respuesta reflectiva. Finalmente, el coeficiente de absorción se obtiene a partir de las transformadas de Fourier de las señales directa y reflejada en la muestra.

**KEYWORDS:** Absorción sonora, Tubo de impedancias, Método de reflexión

## 1. INTRODUCCIÓN

El coeficiente de absorción de los materiales acústicos puede medirse mediante tres métodos [1]: en cámara reverberante, en un tubo de impedancias, y por reflexión. El método de la cámara de reverberación proporciona el coeficiente de absorción Sabine, que es una aproximación del coeficiente de absorción en incidencia difusa. El método del tubo de impedancias [2] da el coeficiente de absorción de onda plana en incidencia normal. El método de reflexión aporta el coeficiente de absorción de onda plana en incidencia oblicua de dispositivos in situ [3].

Aunque los métodos del tubo de impedancias y de reflexión proporcionan el coeficiente de absorción de la muestra como una función de la frecuencia, el método de reflexión parte de las respuestas impulsivas del sistema electroacústico altavoz-micrófono medidas en campo libre y enfrente de la muestra. Para medir estas respuestas impulsivas se pueden usar, entre otras, señales MLS [1]. Cada una de estas respuestas impulsivas está compuesta de una serie de eventos: señal directa altavoz-micrófono, señal reflejada en la muestra, señal difractada en los bordes, señal altavoz-muestra-altavoz-micrófono, señal reflejada en el suelo, etc. Para el cálculo del coeficiente de absorción por el método de reflexión se han de usar solo los eventos directo y reflejado en la muestra. Eliminando el evento directo de la respuesta impulsiva enfrente de la muestra por el método de substracción [4], se pueden recuperar los eventos directo y reflejado en la muestra ventaneando las respuestas impulsivas en campo libre y enfrente de la muestra, respectivamente. El cociente de las transformadas de Fourier de estos eventos proporciona el coeficiente de reflexión, a partir del cual se puede calcular el coeficiente de absorción.

Así pues, mientras que el método del tubo de impedancias funciona en el dominio de la frecuencia, el de reflexión trabaja fundamentalmente en el dominio del tiempo. Sin embargo, ya que la absorción es una característica intrínseca del material acústico, ambos métodos han de proporcionar el mismo coeficiente. El objetivo de este trabajo es llevar a cabo una comparación entre ambos métodos de obtención del coeficiente de absorción de un panel microperforado (MPP) [5]. En la Sección 2 se revisa el coeficiente de absorción de un MPP en el dominio de la frecuencia. En la Sección 3 se obtiene el coeficiente de absorción del MPP en el dominio del tiempo. En la Sección 4 se comparan ambos métodos.

## 2. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Considérese un MPP de impedancia acústica  $Z_m$ , enfrente de una pared rígida, con una cavidad de aire de espesor  $D$  entre ambas. Sea  $Z_0$  la impedancia acústica del aire, y  $Z_1$  y  $Z_2$  las impedancias acústicas a un lado y a otro del MP. El coeficiente de absorción de onda plana en incidencia normal de este sistema absorbente es

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

donde

$$R(f) = \frac{Z_1(f) - Z_0}{Z_1(f) + Z_0}. \quad (2)$$

La impedancia acústica de entrada al MPP es

$$Z_1 = Z_m + Z_2, \quad (3)$$

donde  $Z_2$ , la impedancia acústica a la entrada de la cavidad de aire es

$$Z_2 = -jZ_0 \cot(kD), \quad (4)$$

siendo  $k = \omega/c$  el número de onda. Para completar el modelo se requiere la impedancia acústica del MPP. Pfretzschner *et al.* [6] combinan un panel más grueso, menos perforado, y con agujeros de tamaño milimétrico, con otro más fino, más perforado, con agujeros micrométricos, para conseguir un MPP con propiedades mecánicas más manejables. El absorbente resultante se denomina Microperforated Insertion Unit (MIU). La impedancia acústica de un MIU tal es [7]

$$Z_m = j \frac{\omega \rho t_1}{p_1} \left[ 1 - \frac{2 J_1(x_1 \sqrt{-j})}{x_1 \sqrt{-j} J_0(x_1 \sqrt{-j})} \right]^{-1} + \frac{\sqrt{2} \eta x_1}{p_1 d_1} + j \frac{0.85 \omega \rho d_1}{p_1}, \quad (5)$$

$$+ j \frac{\omega \rho t_2}{p_2} \left[ 1 - \frac{2 J_1(x_2 \sqrt{-j})}{x_2 \sqrt{-j} J_0(x_2 \sqrt{-j})} \right]^{-1} + \frac{\sqrt{2} \eta x_2}{p_2 d_2} + j \frac{0.85 \omega \rho d_2}{p_2}$$

donde  $(d_1, t_1, p_1)$  son el diámetro de los agujeros, el espesor y el porcentaje de perforación del panel grueso, y  $(d_2, t_2, p_2)$  son el diámetro de los agujeros, el espesor y el porcentaje de perforación del panel micrométrico,  $\rho$  y  $\eta$  son la densidad y el coeficiente de viscosidad del aire, respectivamente,  $J_0$  and  $J_1$  son funciones de Bessel de primera clase y orden cero y uno, respectivamente, y

$$x_1 = \frac{d_1}{\sqrt{\frac{4\eta}{\rho\omega}}}, \quad x_2 = \frac{d_2}{\sqrt{\frac{4\eta}{\rho\omega}}}. \quad (6)$$

### 3. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

El cálculo del coeficiente de absorción por el método de reflexión está basado en la ecuación

$$\alpha(f) = 1 - \frac{\left| \mathfrak{F}\{s_r(t) \cdot y(t) \cdot w_r(t)\} \right|^2}{\left| \mathfrak{F}\{s_d(t) \cdot d(t) \cdot w_d(t)\} \right|^2}, \quad (7)$$

donde  $y(t) = z(t) - d(t)$ ,  $d(t)$  y  $z(t)$  son las respuestas impulsivas en campo libre y enfrente de la muestra, respectivamente,  $s_d(t)$  y  $s_r(t)$  son las correcciones por divergencia esférica de ambas respuestas impulsivas,  $w_d(t)$  y  $w_r(t)$  son las ventanas temporales para extraer los eventos directo y reflejado en la muestra de las correspondientes respuestas impulsivas, y  $\mathfrak{F}$  denota transformada de Fourier.

La medida de un sistema lineal, invariante en el tiempo, en el dominio del tiempo, puede ser modelada por un proceso convolucional [8, 9], donde la traza medida,  $z(t)$ , es la convolución de la señal directa,  $d(t)$ , con la respuesta impulsiva,  $ri(t)$ ,

$$z(t) = d(t) * ri(t). \tag{8}$$

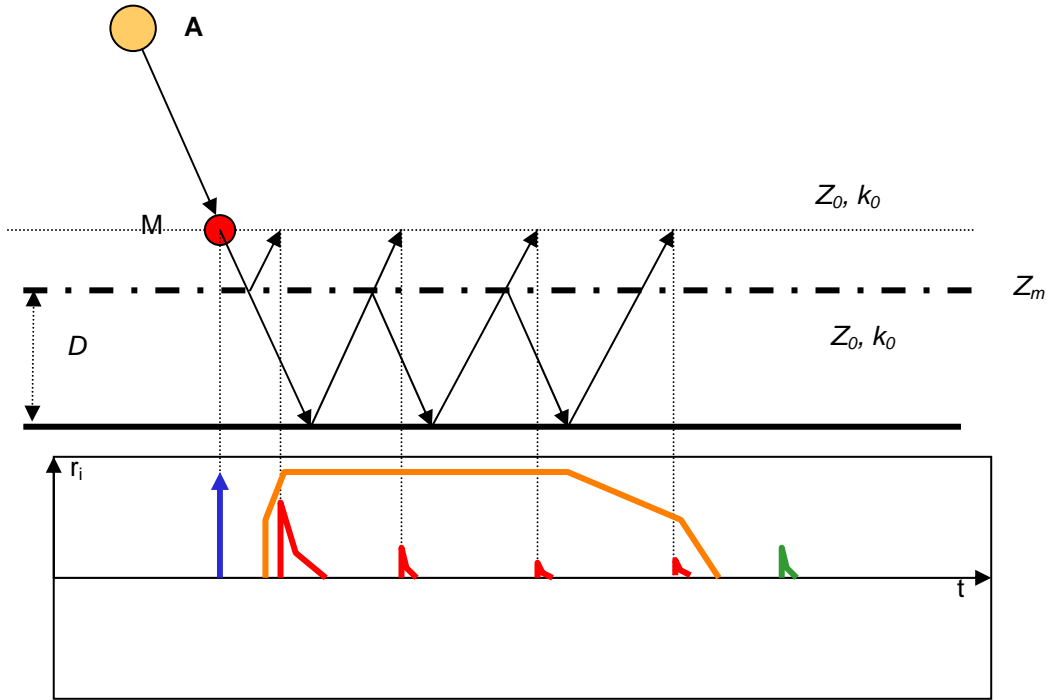


Figura 1: Modelo convolucional de reflexión

La traza de reflexión del MIU esbozado en la Figura 1 es

$$z(t) = d(t) * \left[ \delta(t - \tau_{lm}) + \sum_{n=0}^{\infty} r_{i,n} \delta(t - \tau_{lm} - 2\tau_{ms} - 2 \cdot n \cdot \tau_D) \right], \tag{9}$$

donde  $r_{i,n}$  son los coeficientes impulso,  $\tau_{lm} = d_{LM} / c = \tau_d$  es el tiempo de viaje altavoz-micrófono,  $\tau_{ms} = d_{MS} / c$  es el tiempo de viaje micrófono-muestra, y  $\tau_D = D / c$  es el tiempo de viaje en la cavidad de aire. Nótese que el primer término en la respuesta impulsiva,  $\delta(t - \tau_{lm})$  da lugar a la señal directa en la traza. Como quiera que esta señal se elimina por la técnica de la substracción, no se considera en lo que sigue. La respuesta impulsiva es entonces

$$ri(t) = \sum_{n=0}^{\infty} r_{i,n} \delta(t - \tau_{lm} - 2\tau_{ms} - 2 \cdot n \cdot \tau_D). \tag{10}$$

El primer coeficiente en la respuesta impulsiva,  $r_{i,0}$ , es el coeficiente de reflexión en la interfaz aire-MIU,  $r_{i,0} = r$ . Sea  $\xi$  el coeficiente de transmisión a través de dicha interfaz. El coeficiente impulso n-ésimo es  $r_{i,n} = r^{n-1} \xi^2$ . Así que la respuesta impulsiva del MIU será

$$ri(t) = r \delta(t - \tau_{lm} - 2\tau_{ms}) + \sum_{n=1}^{\infty} r^{n-1} \xi^2 \delta[t - (\tau_{lm} + 2\tau_{ms} + 2 \cdot n \cdot \tau_D)]. \quad (11)$$

El coeficiente de reflexión en la interfaz aire-MIU-aire es [7]

$$r = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \frac{Z_m}{Z_m + 2Z_0} \right\}, \quad (12)$$

y el coeficiente de transmisión

$$\xi = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \frac{2Z_0}{Z_m + 2Z_0} \right\}. \quad (13)$$

La Figura 2b muestra la traza de reflexión, con el evento directo substraído, en un MIU de parámetros  $(d_1, t_1, p_1, d_2, t_2, p_2, D) = (7 \text{ mm}, 1 \text{ mm}, 10 \%, 39 \text{ mm}, 35 \text{ mm}, 1.4 \%, 5 \text{ cm})$ , obtenida convolucionando la respuesta impulsiva de la Ec. (11) con la señal altavoz-micrófono directa de la Figura 2a. Esta señal directa corresponde a la respuesta altavoz-micrófono obtenida cuando el altavoz es excitado con un filtro inverso para radiar señales de mínima longitud [10].

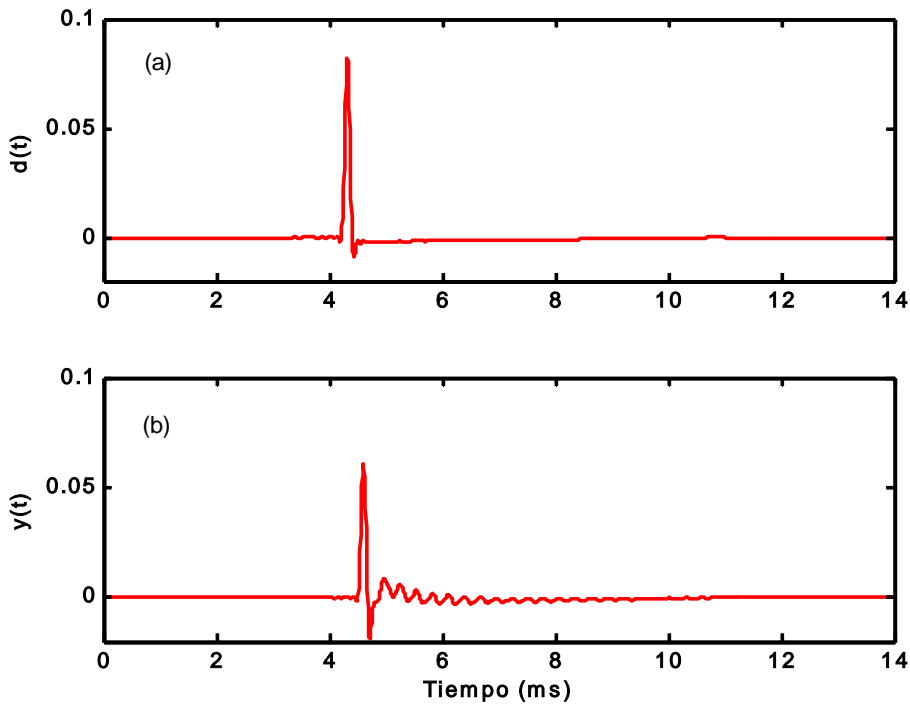


Figura 2: (a) Señal altavoz-micrófono directa. (b) Trazo de reflexión del MIU con la señal directa substraída

#### 4. COMPARACIÓN ENTRE AMBOS MÉTODOS

La Figura 3 muestra los coeficientes de absorción modelizados para un MIU de parámetros  $(d_1, t_1, p_1, d_2, t_2, p_2, D) = (7 \text{ mm}, 1 \text{ mm}, 10 \%, 39 \text{ mm}, 35 \text{ mm}, 1.4 \%, 5 \text{ cm})$  y  $d_{ms} = 5 \text{ cm}$ . La curva en el dominio de la frecuencia ha sido obtenida usando las Ecs. (1-5). La curva en el dominio temporal ha sido obtenida procesando las señales directa y reflejada en la muestra de la Figura 2, con ventanas de longitud 550 ms. Como se puede observar, ambas curvas son indistinguibles.

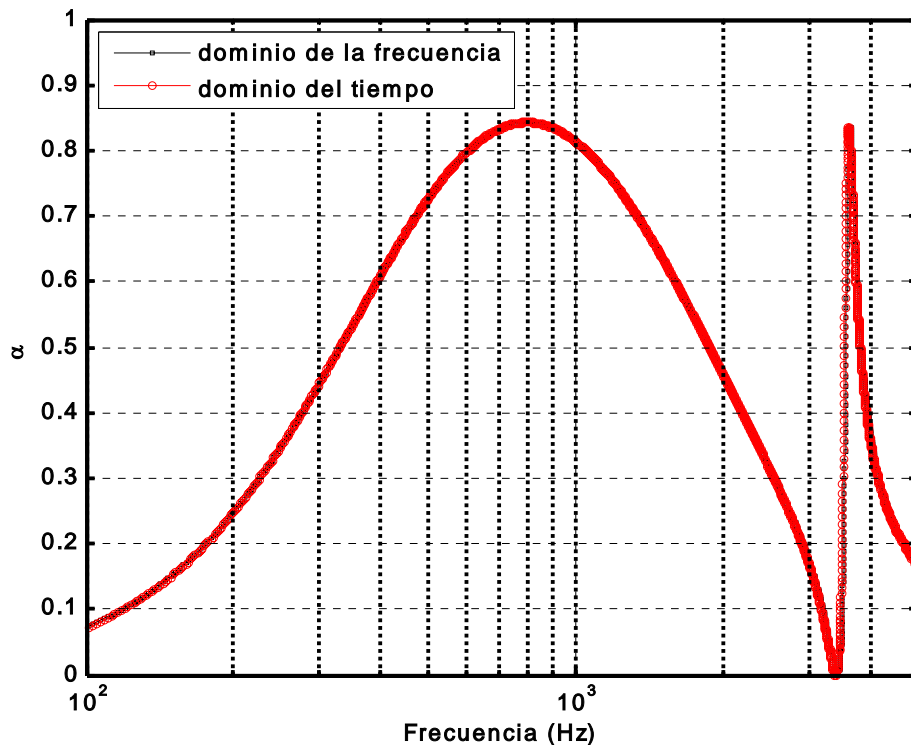


Figura 3: Coeficientes de absorción de un MIU en los dominios del tiempo y de la frecuencia

El modelo convolucional permite analizar el efecto del truncamiento del ventaneo de las señales directa y reflejada en la muestra. Como se discutió en la Sección 3, para separar el evento reflejado en la muestra de difracciones en el borde y reflexiones en el altavoz y en el suelo, es menester multiplicar por una ventana temporal. El borde inicial de esta ventana es el tiempo de llegada del evento reflejado, y el borde final es el tiempo de llegada del primer evento difractado o reflejado en otros objetos. Estos tiempos de llegada dependen de la geometría de medida: distancia altavoz-micrófono, distancia micrófono-muestra y tamaño de la muestra.

La Figura 4 muestra cuatro ventanas temporales, de longitud decreciente, con borde de ataque coincidente, superpuestas a la traza de reflexión de la Figura 2b. Las ventanas temporales tienen una parte central rectangular, y bordes de ataque y de caída con forma de funciones de semi-Blackman-Harris [2]. La Figura 5 muestra las curvas de absorción calculadas a partir de la traza de reflexión ventaneada por estas cuatro funciones, en comparación con la curva de absorción en el dominio de la frecuencia. Como se puede ver, cuanto más corta es la ventana, más alta es la mínima frecuencia fiable del método. Las curvas de absorción obtenidas con las ventanas  $w_1$  y  $w_2$  apenas difieren de la curva de

absorción en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, las curvas de absorción obtenidas con las ventanas más cortas,  $w_3$  y  $w_4$ , se desvían de la curva en el dominio de la frecuencia en la parte de baja frecuencia. De hecho, se puede establecer la mínima frecuencia fiable de este método como el primer cero del modulo espectral de la ventana temporal [10].

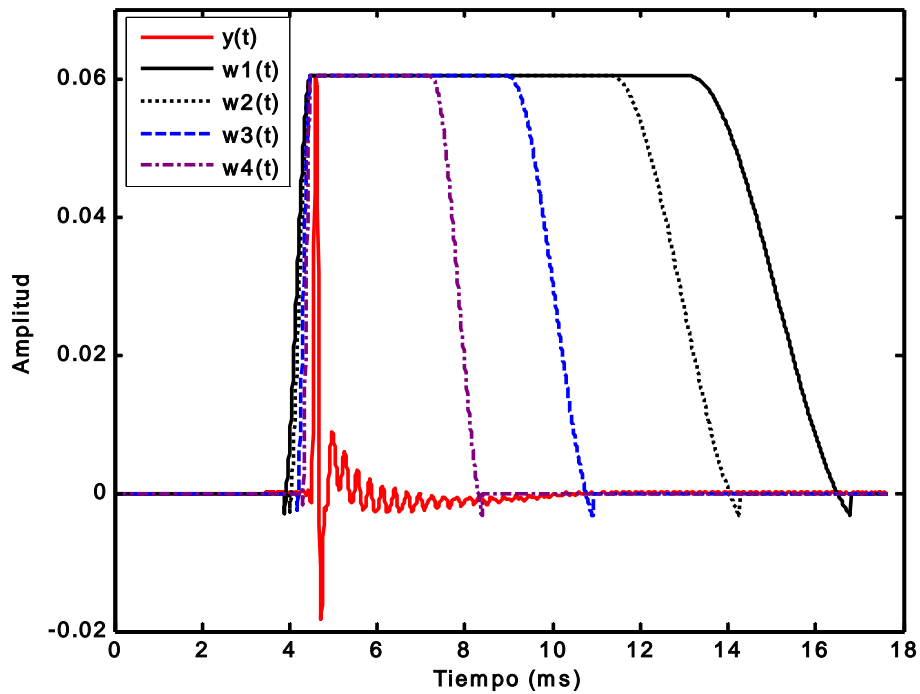


Figura 4: Ventanas de diferente longitud superpuestas a la traza de reflexión

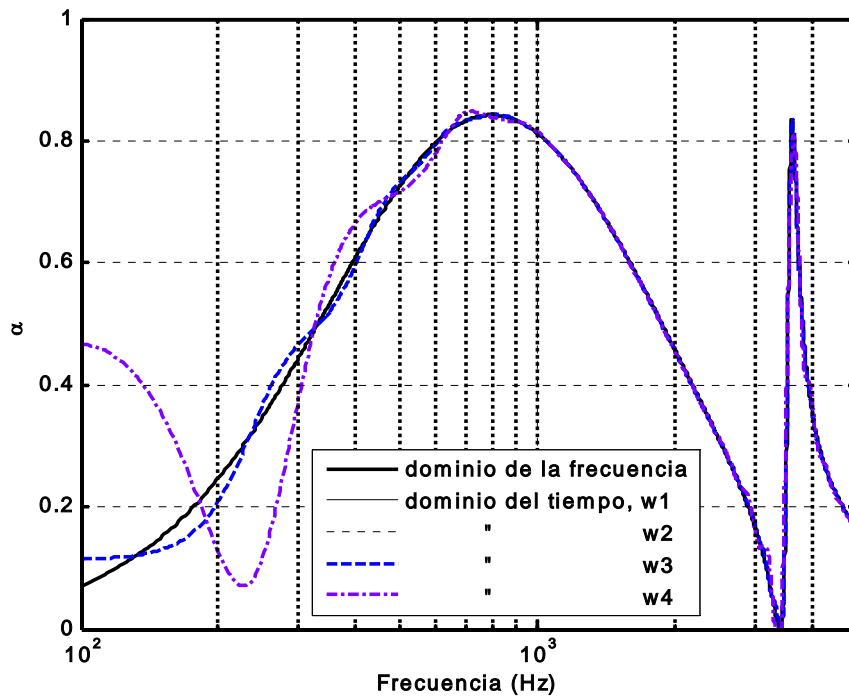


Figura 5: Coeficientes de absorción en el dominio del tiempo obtenidos con las ventanas de la Figura 4, superpuestos con el coeficiente de absorción en el dominio de la frecuencia

## 5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha llevado a cabo una comparación formal entre los coeficientes de absorción de un MIU en los dominios del tiempo y de la frecuencia. En el dominio de la frecuencia, el coeficiente de absorción se calcula a partir del contraste de impedancias entre el sistema absorbente y el medio. En el dominio del tiempo, el coeficiente de absorción se calcula a partir de las respuestas impulsivas de un sistema altavoz-micrófono medidas en campo libre (traza directa) y enfrente de la muestra (traza de reflexión). Debido a la presencia de otros eventos en ambas trazas (difracciones, reflexiones en otros objetos) es necesario extraer los eventos directo y reflejado en la muestra mediante la multiplicación de ambas trazas por ventanas temporales debidamente situadas.

La traza de reflexión ha sido modelada convolucionando la respuesta impulsiva del sistema absorbente con la señal directa altavoz-micrófono. Esta respuesta impulsiva contiene una suma infinita de coeficientes impulso retardados, que son funciones de los coeficientes de reflexión y transmisión en la interfaz aire-MIU-aire. Cuando la traza de reflexión es suficientemente larga (cuando la ventana temporal es muy larga) las curvas de absorción en los dominios del tiempo y de la frecuencia son coincidentes. La aplicación de una ventana temporal para rechazar difracciones y reflexiones parásitas produce un efecto de truncamiento. En consecuencia, parte de la energía de baja frecuencia es eliminada de las señales procesadas. El método de cálculo del coeficiente de absorción tiene una mínima frecuencia fiable que se puede establecer como el primer cero del módulo espectral de la ventana.

## 6. AGRADECIMENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Plan Nacional de I+D, a través del Proyecto DPI2004-05504-C02-01.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Garai M. (1993). Measurement of the sound-absorption coefficient in situ: the reflection method using periodic pseudo-random Sequences of Maximum Length. *Applied Acoustics*, vol. 39, pp. 119-139.
- [2] ISO 10534-2: 1996. Acoustics – determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: transfer function method.
- [3] CEN/TS 1793-5: 2003. Road traffic noise reduction devices- Test method for determining the acoustic performance- Part 5: Intrinsic characteristics- In situ values of sound reflection and airborne sound insulation.
- [4] Mommertz E., (1995). Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique. *Applied Acoustics*, vol. 46, pp. 251-263.
- [5] Maa D.Y., (1998). Potential of microperforated panel absorber. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 104, pp. 2861-2866.
- [6] Pfretzschner, J., Cobo, P., Simón, F., Cuesta, M. & Fernández, A., (2006). Microperforated Insertion Units: An alternative strategy to design microperforated panels. *Applied Acoustics*, vol. 67, pp. 62-73.
- [7] Cobo, P., (2006). A model comparison of the absorption coefficient of a Microperforated Insertion Unit in the frequency and time domains. Accepted for publication in *Applied Acoustics*.
- [8] Robinson E.A., (1984) *Seismic inversion and deconvolution*. London: Geophysical Press.
- [9] Cobo, P. & Ranz, C., (1989). Direct and inverse problems in layered sea bottoms including attenuation: Synthetic data. *ACUSTICA*, vol. 69, pp. 81-97.



[10] Cobo, P., Fernández, A. & Cuesta, M., (2006). Measuring short impulse responses with inverse filtered maximum-length sequences. Accepted for publication in *Applied Acoustics*.