

## CUALIFICACION IN SITU DE DISPOSITIVOS ANTIRRUIDO POR EL METODO ADRIENNE

PACS: 43.50.Gf

Pedro Cobo y Carlos Ranz

Instituto de Acústica. CSIC.  
Serrano 144. 28006 Madrid  
e-mail: iacpc24@fresno.csic.es

### SUMMARY

The Adrienne method combines the MLS method with the signal subtraction technique. The MLS method affords the impulse response of the system. The subtraction technique allows to separate optimally the direct and sample-reflected signals. Maximum separation between the sample-reflected and the nearest events in the reflection trace is required in order the lowest reliable frequency to be minimum. Therefore, the microphone should be as close as possible to the sample whilst the loudspeaker should be as far as possible to the sample. As a consequence, the direct and sample-reflected events in the trace are close each other.

This work deals with the optimization of the loudspeaker-microphone setup, given the sample height, in order to get the best lowest reliable frequency.

### INTRODUCCION

Las barreras acústicas son uno de los dispositivos de control pasivo del ruido más populares. Su misión es la de obstruir la transmisión directa entre la fuente de ruido (tráfico rodado o ferroviario) y el receptor (la población). Existe un Comité Europeo, CEN/TC226, que se ocupa de la caracterización acústica de estos dispositivos. La norma europea EN 1793, "*Dispositivos reductores del ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar su comportamiento acústico*", consta de 5 partes, de las cuales, la parte 1793-5, se refiere a la caracterización *in situ* de la absorción acústica y aislamiento a ruido aéreo. Ante la ausencia de métodos normalizados de medida *in situ*, surgió el Proyecto Europeo MAT1-CT94049 "ADRIENNE", cuyo objetivo fundamental era poner a punto un método que:

- Fuese relevante para caracterizar barreras antirruido en carreteras.
- Fuese capaz de caracterizar todos los dispositivos antirruido que circulan en el mercado europeo, tanto planos como volumétricos.
- Usara esencialmente los mismos principios y equipamiento para la medida de la absorción y del aislamiento.
- Se pudiera aplicar tanto *in situ* como en laboratorio.
- Proporcionara las medidas de absorción y aislamiento en las bandas de tercio de octava entre 100 Hz y 5 kHz.

El método resultante es conocido como método Adrienne (Clairbois et al, 1998ab; Cobo et al, 1997; Cobo y Santiago, 1997). A continuación se describen los fundamentos de la medida de la absorción (o de la Pérdida por Reflexión, RL) por el método Adrienne.

### EL METODO ADRIENNE PARA LA MEDIDA DE RL



El método Adrienne combina el método MLS para la medida de la traza de reflexión con la técnica de substracción de señal para separar la señal directa de la señal reflejada en la muestra (Cobo et al, 1997). La absorción acústica,  $\alpha(f, \theta)$ , y el coeficiente de reflexión en la muestra,  $R_p(f, \theta)$ , están relacionadas por

$$a(f, \theta) = 1 - |R_p(f, \theta)|^2 \tag{1}$$

donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia. La Pérdida por Reflexión promediada sobre n medidas,  $RL$ , se define como (Cobo et al, 1997)

$$RL(\Delta f_i) = |R_p|^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\int_{\Delta f_i} [p_{r,k}(t)d(t)w(t)]^2 df}{\int_{\Delta f_i} [p_d(t)d(t)w(t)]^2 df} \tag{2}$$

donde  $p_d(t)$  y  $p_{r,k}(t)$  son las señales directa y reflejada en la muestra, respectivamente,  $d(t)$  es la función de corrección por divergencia esférica, y  $w(t)$  es la ventana que selecciona los eventos directo y reflejado de las trazas directa y reflejada en la muestra. En el método Adrienne se promedia sobre  $m \cdot n$  trazas, donde  $n=1,2,\dots,9$ , correspondientes a ángulos de incidencia (50°, 60°, 70°, 80°, 90°, 100°, 110°, 120°, 130°) (90° corresponde a la incidencia normal en la muestra), y  $m$  es el número de puntos significativos en la muestra. Para una muestra plana  $m=1$ , mientras que para una muestra en zig-zag  $m=3$ . El ventaneo proporciona el evento deseado en la traza a costa de resolución en baja frecuencia. La frecuencia más baja fiable está relacionada con el tipo y tamaño de la ventana usada. El método Adrienne, para una separación altavoz-micrófono de 1.25 m, una separación micrófono muestra de 0.25 m, y una altura de barrera de 4 m, usa una ventana asimétrica con un borde de ataque tipo semi-Blackman-Harris de 0.5 ms, una parte central rectangular de 5.18 ms, y un borde de caída tipo semi-Blackman-Harris de 2.22 ms. La ventana resultante, de 7.44 ms, se conoce como ventana Adrienne (Cobo y Santiago, 1997).

### OPTIMIZACION DE LA CONFIGURACION GEOMETRICA

La ventana Adrienne descrita adolece de algunas limitaciones:

- Se calculó para una altura de barrera fija de 4 metros.
- Considera una geometría altavoz-micrófono fija.
- No tuvo en cuenta la reflexión en el suelo.

Cobo (1998) demostró que puede optimizarse la configuración altavoz-micrófono respecto a la barrera para obtener la mínima frecuencia más baja fiable. Para la geometría de la Figura 1, se pueden calcular los tiempos de viaje de cada uno de los eventos en la traza de reflexión. Las ecuaciones (3-7) corresponden a los tiempos de viaje de las señales directa,  $t_d$ , reflejada en la muestra,  $t_r$ , difractada en el borde,  $t_e$ , difractada en el altavoz,  $t_l$ , y reflejada en el suelo,  $t_s$ , respectivamente.

$$t_d = d_{LM} / c \tag{3}$$

$$t_r = \frac{1}{c} \sqrt{4d_{LS}^2 + d_{LM}^2 - 4d_{LS}d_{LM} \cos J_i} \tag{4}$$

$$t_e = \frac{1}{c} \sqrt{d_{LS}^2 + d_{SE}^2} + \sqrt{d_{LS}^2 + d_{SE}^2 + d_{LM}^2 - 2d_{LM} \sqrt{d_{LS}^2 + d_{SE}^2} \cos \theta - q_i} \tag{5}$$

$$t_l = \frac{1}{c} (d_{LS} + d_{LM}) + \frac{1}{c} (d_{LM} + 2d_{MS}) \tag{6}$$



$$t_f = \frac{1}{c} \sqrt{4d_{SE}^2 + d_{LM}^2 - 4d_{SE}d_{LM}\sin J_i} \quad (7)$$

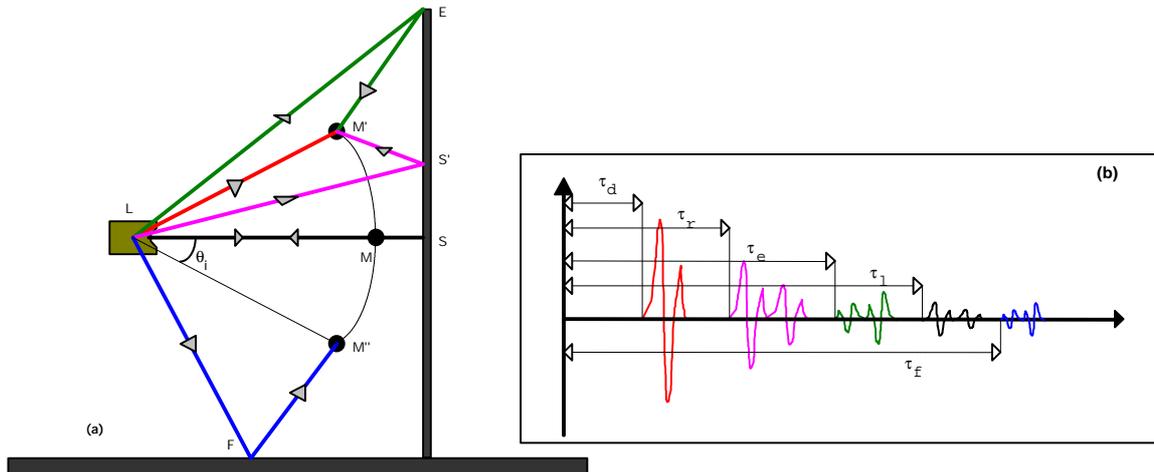


Figura 1. (a) Disposición geométrica del sistema electroacústico respecto a la barrera para la medida de RL. (b) Aspecto de la traza medida por el sistema

Para máxima resolución en baja frecuencia conviene que la ventana Adrienne tenga la máxima longitud. Para ello, el micrófono ha de estar lo más próximo posible (limitado por el campo próximo) a la muestra, y el altavoz lo más alejado posible de ambos. La ventana Adrienne ha de encajar entre el inicio de la señal reflejada más próxima y el inicio del evento (reflexión en el suelo o difracción en el borde o en el altavoz) más próximo. El inicio más próximo corresponde a la señal reflejada en incidencia normal. El borde inicial de la ventana será, por tanto,

$$t_1 = t_r(q = 90^\circ) = \frac{1}{c} b d_{LS} - d_{LM} g = \frac{1}{c} b_{LM} + 2d_{MS} \zeta \quad (8)$$

El borde final de la ventana vendrá determinado por el evento más próximo en el caso más desfavorable ( $\varphi = 40^\circ$ ). La Figura 2 muestra los retardos entre los diferentes eventos en la traza de reflexión en función de  $d_{LM}$  y  $d_{MS}$ , para  $\varphi = 40^\circ$ . Como puede verse, las superficies  $b_l - t_r \zeta$  y  $d_f - t_r i$  siempre se cortan. A la izquierda de esta curva de corte, el borde posterior vendría determinado por el tiempo de viaje del evento difractado en el altavoz. A la derecha de esta curva, sin embargo, el borde derecho correspondería al tiempo de viaje del evento reflejado en el suelo. Obviamente, la geometría óptima corresponderá a aquellas separaciones para las que ambos tiempos de viaje coinciden.

De las Ecs. (6) y (7), se obtiene entonces la separación óptima entre altavoz y micrófono, dadas la separación micrófono-muestra y la semi-altura de la barrera.

$$d_{LM,opt} = \frac{\sqrt{b^2 d_{MS}^2 + 4d \sin 40^\circ g + 128 a_{SE}^2 - d_{MS}^2} h}{16} (12d_{MS} + 4d_{SE} \sin 40^\circ) \quad (9)$$

El borde superior de la ventana Adrienne será entonces



$$t_2 = \frac{1}{c} d_{LM,opt} + 2d_{MS} \quad (10)$$

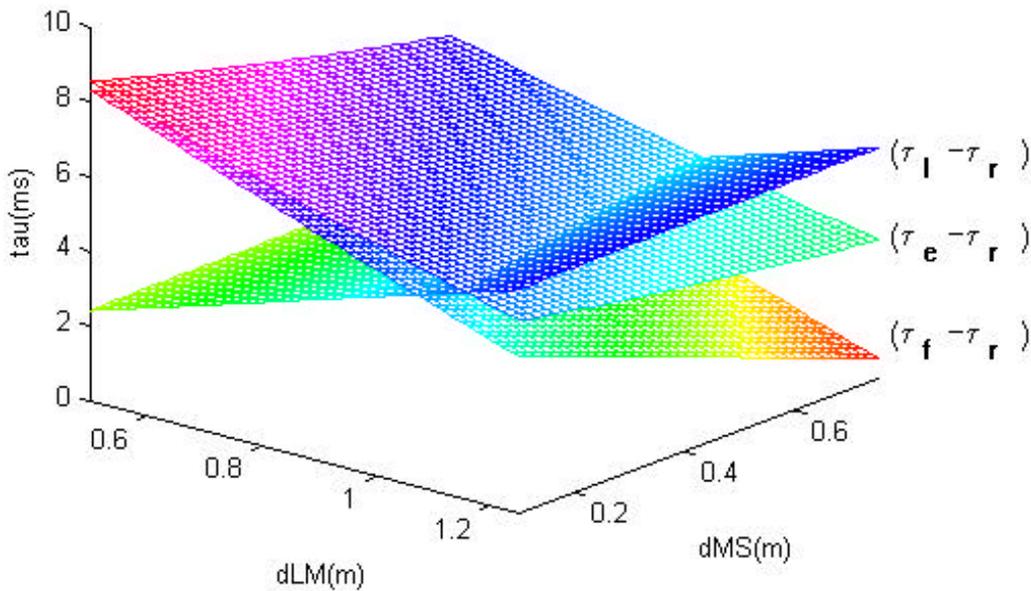


Figura 2. Retardos entre eventos, para  $\theta = 40^\circ$ , en función de  $d_{LM}$  y  $d_{SE}$

### LA MINIMA FRECUENCIA FIABLE

El efecto de truncamiento del ventaneo es bien conocido (Nuttal, 1981; Gade y Herlufsen, 1987). Cuando se ventanea una señal, se pierde información de baja frecuencia. Con referencia a la Figura 3, sean  $f_l$  la frecuencia más baja fiable, y  $\delta f = (1/N t)$  el intervalo espectral.

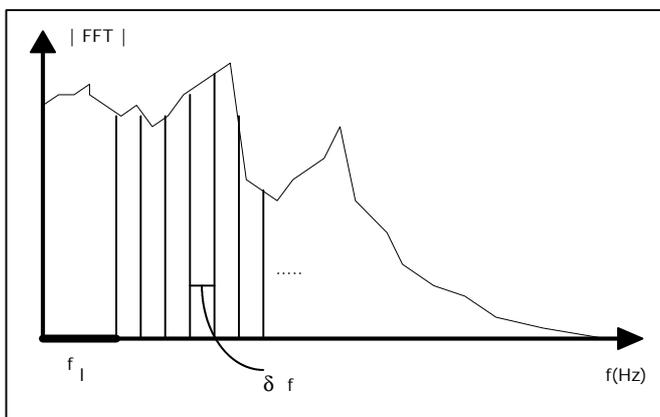


Figura 3. Mínima frecuencia fiable e intervalo frecuencial



El intervalo espectral puede hacerse tan pequeño como se quiera incrementando N, el tamaño de la transformada de Fourier (*zero padding*). Para una ventana rectangular  $f_f=1/T_W$ , donde  $T_W$  es la duración de la ventana. Para otro tipo de ventana, podemos definir  $f_f$  como el primer cero de su Transformada de Fourier.

La ventana Adrienne contiene (Cobo, 1998):

- Un borde de ataque, tipo semi-Blackman-Harris, de 0.05 (  $2^{-1}$  ) ms de duración.
- Un tramo central rectangular de longitud 0.7 (  $2^{-1}$  ) ms.
- Un borde de caída, tipo semi-Blackman-Harris, de 0.3 (  $2^{-1}$  ) ms de duración.

Así pues, el ancho de la ventana Adrienne,  $T_{AW}$ , será

$$T_{AW} = 1.05(t_2 - t_1) \quad (11)$$

La Tabla 1 presenta las geometrías óptimas ( $d_{MS}, d_{LM}$ ), la duración de la ventana Adrienne,  $T_{AW}$ , y las frecuencias más bajas fiables,  $f_f$ , para las semi-alturas de barreras  $d_{SE}=1.5, 1.75, y 2 m$ .

Tabla 1. Geometría altavoz-micrófono óptima ( $d_{MS}$ ,  $d_{LM}$ ), duración de la ventana Adrienne,  $T_{AW}$ , y mínima frecuencia fiable,  $f_f$ , para semi-alturas de barrera  $d_{SE}=1.5, 1.75 y 2 m$

$d_{SE}=1.5 m$			$d_{SE}=1.75 m$			$d_{SE}=2 m$		
( $d_{MS}, d_{LM}$ ) (m)	$T_{AW}$ (ms)	$f_f$ (Hz)	( $d_{MS}, d_{LM}$ ) m	$T_{AW}$ (ms)	$f_f$ (Hz)	( $d_{MS}, d_{LM}$ ) m	$T_{AW}$ (ms)	$f_f$ (Hz)
(0.10,0.79)	4.638	245	(0.10,0.93)	5.468	208	(0.10,1.07)	6.298	183
(0.15,0.76)	4.467	250	(0.15,0.90)	5.297	213	(0.15,1.04)	6.127	189
(0.20,0.73)	4.297	262	(0.20,0.87)	5.127	220	(0.20,1.01)	5.956	192
(0.25,0.70)	4.128	268	(0.25,0.84)	4.957	228	(0.25,0.99)	5.786	195
(0.30,0.67)	3.958	280	(0.30,0.81)	4.787	235	(0.30,0.96)	5.616	200
(0.35,0.64)	3.789	290	(0.35,0.79)	4.618	243	(0.35,0.93)	5.447	208
(0.40,0.62)	3.621	305	(0.40,0.76)	4.449	250	(0.40,0.90)	5.278	213
(0.45,0.59)	3.453	317	(0.45,0.73)	4.281	260	(0.45,0.87)	5.109	220
(0.50,0.56)	3.285	330	(0.50,0.70)	4.112	268	(0.50,0.84)	5.940	228

## RESULTADOS

A lo largo del Proyecto Adrienne se construyó en el CSTB (Grenoble) una barrera de 20 m de larga y 4 m de alta, con diferentes tramos, cada uno de ellos con un material distinto. La geometría decidida a lo largo del Proyecto ( $d_{LM}=1.25 m, d_{MS}=0.25 m$ ) para esta altura de barrera no es la óptima. Como consecuencia, en una ventana de 7.44 ms, cuya frecuencia más baja fiable sería 175 Hz, se cuean las reflexiones en el suelo cuando el sistema



altavoz-micrófono está orientado hacia abajo. Este hecho es evidente en la Figura 4, correspondiente a las curvas promedio de RL para un material de chapa perforada rellena con material absorbente, el MICE. Como puede observarse, el promedio entre 50° y 90° contiene un pico a 500 Hz que no se justifica en la ligera asimetría de los bordes superior e inferior de los paneles de MICE. Cuando se procesan las señales con una ventana Adrienne de 4.6 ms, Figura 5, la frecuencia más baja fiable es de 240 Hz, y las curvas RL correspondientes a los promedios hacia arriba y hacia abajo son prácticamente idénticas. Es obvio que en este caso, la ventana excluye las reflexiones del suelo, y el cálculo es más correcto.

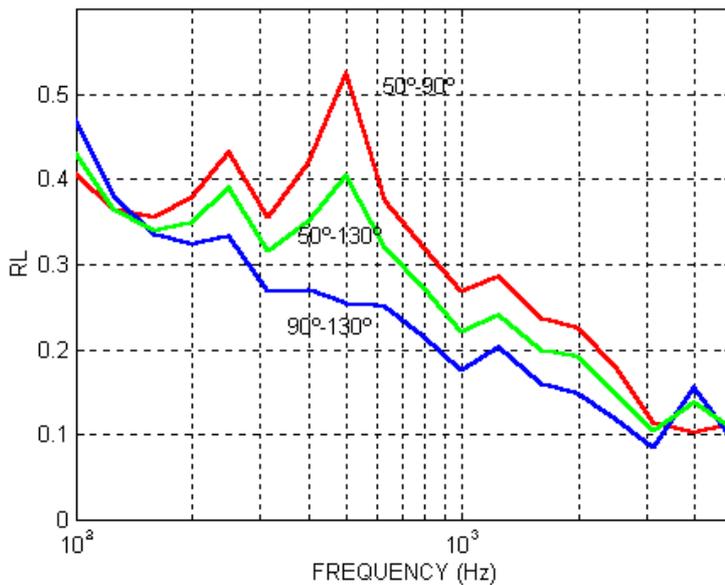


Figura 4. Curvas RL para el MICE, con una ventana de 7.44 ms (Según Cobo and Santiago, 1997)

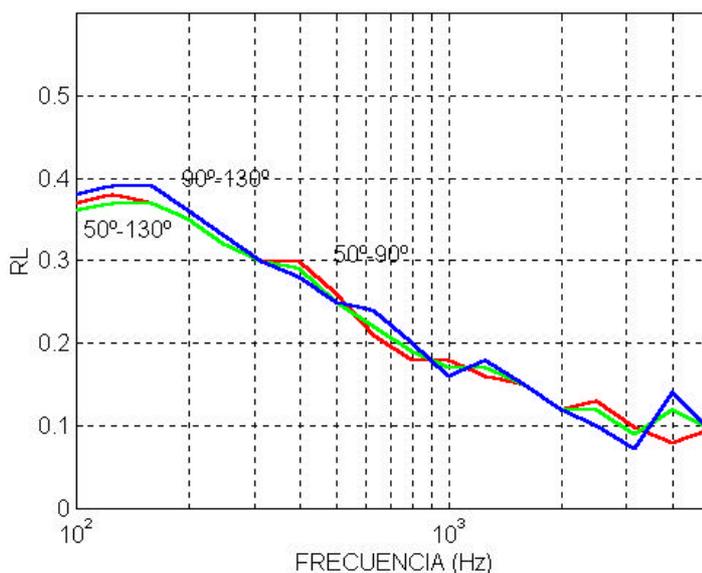


Figura 5. Curvas RL para el MICE, con una ventana de 4.6 ms (Según Corral, 1999)



## RESUMEN Y CONCLUSIONES

El método Adrienne combina el método MLS con la técnica de la substracción de señal para el cálculo *in situ* de la RL de una barrera antirruído. Las señales directa y reflejada en la muestra se extraen de las trazas directa y reflejada, respectivamente, por ventaneo. La frecuencia más baja fiable del método depende de la duración de la ventana. Para que esta frecuencia sea mínima, la separación entre los eventos reflejado en la muestra y difractado en el altavoz o reflejado en el suelo ha de ser máxima. Dada la semi-altura de la barrera y la separación micrófono-muestra, este trabajo presenta la separación altavoz-micrófono óptima para mínima frecuencia más baja fiable.

## REFERENCIAS

- Clairbois, J.P., Beaumont, J., Garai, M., and Schupp, G., 1998a. "A new in situ method for the acoustic performance of road traffic noise reducing devices". Proc. ICA 98, Seattle, USA.
- Clairbois, J.P., Beaumont, J., Garai, M., and Schupp, G., 1998b. "A new in situ method for the acoustic performance of road traffic noise reducing devices". Proc. Euronoise 98, Munich, Germany.
- Cobo, P., Garai, M., and Santiago, J.S., 1997. "Reflection Loss measurements on flat and non-flat samples using MLS methos with the subtraction technique". Proc. Tecniacustica 97, Oviedo, Spain.
- Cobo, P. and Santiago, J.S., 1997. "Reflection and Transmission Loss measurements on *in situ* samples using the *Adrienne Method*". Project MAT1-CT94049, Doc. ADR5-2.
- Cobo, P., 1998. "Some calculations concerning the Adrienne setup and the lowest reliable frequency". Informe interno, Instituto de Acústica, Madrid.
- Corral Quintana, A., 1999. "Medida *in situ* de la Pérdida acústica por Reflexión de barreras antirruído por el método Adrienne". Proyecto Fin de Carrera, ICAI.
- Gade, S. and Herlufsen, H., 1987. "Windows to FFT analysis". B&K Technical Review, Nº 3 and 4.
- Nuttal, A., 1981. "Some windows with very good sidelobe behaviour". IEEE ASSP Trans., ASSP-29(1), 84-91.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la financiación de los Proyectos SMT MAT-CT94049 "ADRIENNE" , de la UE, y AMB97-1175-C01-03, de la CICYT.

