

Estudio de un filtro acústico simple en el dominio temporal

Anna Bellós, Ana Barjau (*)

Indústries Jordà, Rubí.

(*) Departament d'Acústica. Enginyeria La Salle,
Universitat Ramón Llull.

RESUMEN

El estudio de filtros acústicos formados por elementos axisimétricos (cilindros, conos, tubos perforados...) y ramas laterales (resonadores, etc.) se ha desarrollado tradicionalmente en el dominio frecuencial mediante matrices de transferencia (siempre que las dimensiones de los elementos del filtro permiten formular el problema como uniparamétrico). Existe un elemento muy simple distinto de los anteriores que no suele utilizarse como parte de un filtro y que sin embargo presenta un interés por su facilidad de construcción y su eficacia en un margen de frecuencias notable: una rama cilíndrica cuyos dos extremos desembocan en el filtro. El estudio de este elemento no es evidente en el dominio frecuencial. En esta ponencia se expone su estudio en el dominio temporal y se analiza su interés como filtro acústico.

INTRODUCCIÓN

La utilización de filtros acústicos constituye un método eficaz para disminuir el nivel de presión sonora a la salida de un sistema ruidoso. Un filtro acústico consiste en la asociación en serie o paralelo (en este caso se habla de rama lateral) de distintos elementos que pueden ir desde simples tramos cilíndricos o cónicos a elementos más elaborados como los cilindros concéntricos o los tubos perforados.

Cuando se trata de estudiar el comportamiento de un filtro, el método habitual es el de las Matrices de Transferencia [Munjál, 1987]. Dicho método se basa en la discretización del filtro en tramos (elementos simples para los cuáles se conoce la solución analítica del problema acústico) y en nodos (discontinuidades: cambios de sección o de conicidad, conexiones con ramas laterales...). Las variables acústicas (presión y velocidad, presión y caudal...) al principio y final de cada tramo o a la derecha e izquierda de cada nodo se relacionan entre sí mediante una matriz 2×2 , y el ensamblaje de todas estas matrices da como resultado la Matriz de Transferencia del filtro, que permite obtener el valor de las variables acústicas a la salida del filtro en función del valor de las mismas a la entrada.

Cuando se trata de ramas laterales, la matriz del nodo asociado a la conexión de la rama con el tubo principal contiene la impedancia de ésta en la sección del nodo. Siempre que la rama sea un elemento cuyo extremo final presente una impedancia acústica conocida (condición de contorno conocida), la expresión de la matriz es inmediata.

En esta ponencia se presenta el estudio de un elemento de geometría sencilla pero no habitual en los filtros corrientes: el tubo de Herschel-Quincke (de ahora en adelante se abreviará por tubo de H-Q). Se trata de un tubo cilíndrico que presenta dos conexiones con el tubo principal del filtro (Fig.1). En este caso, el estudio frecuencial no es inmediato, y por este motivo se aborda el problema en el dominio temporal.

MÉTODO DE MULTICONVOLUCIÓN PARA EL TUBO H-Q

El estudio de un filtro en el dominio temporal se basa en el seguimiento de las ondas progresiva y

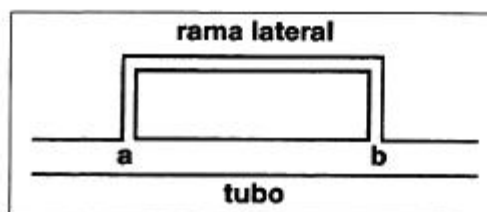


Figura 1.

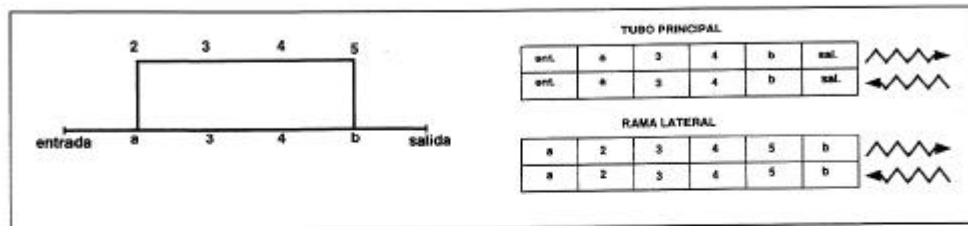


Figura 2

regresiva a lo largo del mismo [Martínez, 1988]. Estas ondas se propagan en los dos sentidos en el interior del filtro y experimentan reflexiones y transmisiones cada vez que alcanzan una discontinuidad. El valor total de la presión (o del caudal) en cualquier punto del filtro viene dado por la suma de los valores de las dos ondas asociadas a dicha variable.

Con el fin de independizar el estudio del tubo H-Q de otros posibles elementos constituyentes de un filtro, se ha supuesto que el tubo principal del filtro es anecoico, de manera que todas las reflexiones que tienen lugar están asociadas a las dos conexiones de la rama lateral con el mismo.

La implementación del cálculo temporal del tubo H-Q parte de la representación del tubo principal y de la rama mediante dos registros cada uno (cuatro, por tanto, en total): uno para la onda progresiva y otro para la regresiva. Cada posición en el registro contiene el valor de la onda correspondiente en un punto del elemento. Así, para un caso como el representado en la Fig.2, los registros de la rama tendrían 6 posiciones (a, 2, 3, 4, 5, b) y los del tubo tendrían 6 (entrada, a, 3, 4, b, salida):

Todas las posiciones Δl distarían de y se necesitaría un tiempo de $\Delta t = \Delta l / c$ para propagarse de una a otra.

A cada Δt , los valores de los cuatro registros se desplazan de posición y, en el caso de que dicho desplazamiento implique atravesar una discontinuidad, el valor correspondiente se convolucionaría con la función de transmisión o reflexión adecuada.

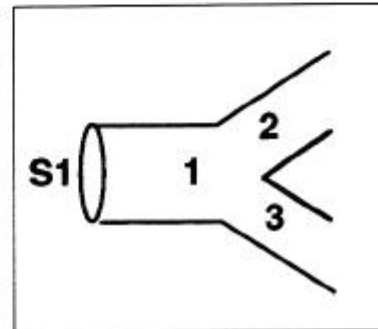


Figura 3

CÁLCULO DE LAS FUNCIONES DE REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN

Las funciones de reflexión y transmisión asociadas a "a" y "b" son del mismo tipo. Tanto si se llega a estas conexiones a través del tubo principal como de la rama, el problema se puede enunciar de la misma manera (Fig.3): una onda incidente se divide en tres, una reflejada que regresa por el mismo conducto del que ha venido y dos transmitidas que se propagan por el interior de los otros dos conductos (uno de los cuáles no es más que la prolongación del conducto de incidencia).

La igualdad de presión en el nodo y la continuidad del caudal

$$p_1^* + p_1^- = p_2^- = p_3^-; u_1^* + u_1^- = u_2^- = u_3^-$$

permiten llegar a las siguientes expresiones:

$$R_1(t) = \frac{p_1^*}{p_1^-} = \frac{S_1 - (S_2 + S_3)}{S_1 + S_2 + S_3} \delta(t); \quad T_{12}(t) = \frac{p_2^-}{p_1^-} = T_{13} = \frac{p_3^-}{p_1^-} = \frac{2S_1}{S_1 + S_2 + S_3} \delta(t).$$

El hecho de que ambas funciones sean impulsionales facilita extraordinariamente las convoluciones: en este caso, se reducen a simples multiplicaciones.

MODELIZACIÓN DE LAS PÉRDIDAS VISCOTÉRMICAS

Para las pérdidas viscotérmicas se ha tomado la formulación clásica [Nederveen, 1967]:

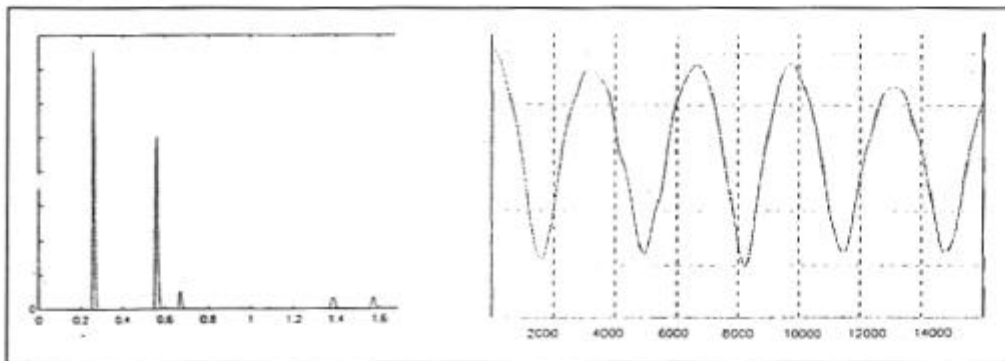
$$\sigma_1(t) = \frac{\xi}{2\sqrt{\pi} (t-L/c)^{3/2}} \text{Exp} \left[-\frac{\xi^2}{4(t-L/c)} \right]$$

donde L es la longitud recorrida por la onda, c es la velocidad del sonido en el aire y ξ es una constante que depende de las características geométricas del tubo y de un factor constante de amortiguamiento (función del material y de las condiciones de humedad del aire). Su inclusión implica nuevas convoluciones: $p(z+L,t) = \sigma(t) * p(z,t)$. Ahora bien, a diferencia del caso anterior, su realización numérica es costosa tanto en tiempo (a medida que aumenta t la operación es más larga) como en memoria (se necesita el conocimiento de toda la historia pasada de $p(t)$ para calcular cada nuevo valor). Sin embargo, si se aproxima $\sigma(t)$ por una función exponencial $\sigma(t) \cong ae^{-\xi t}$ (o una suma de ellas, según la precisión deseada), puede aplicarse un algoritmo de convolución rápida [Barjau, 1990] en el que los dos inconvenientes anteriores quedan eliminados:

$$p(z+L,t+\Delta t) = \sigma(t) * p(z,t+\Delta t) \cong e^{-\xi t} p(z+L,t) + \int_t^{t+\Delta t} \sigma(t+\Delta t-\tau) p(z,\tau) d\tau \cong k_{1p}(z+L,t) + k_{2p}(z,t) + k_{3p}(z,t+\Delta t)$$

RESULTADOS

La Fig.4a muestra la evolución temporal de la presión en la salida como consecuencia de haber inyectado un impulso de presión en la entrada para una rama lateral de 17 cm y diámetro 1 cm, y un tubo principal de 7 cm (medidos entre a y b) y mismo diámetro. El espectro correspondiente se muestra en la Fig.4b. Las frecuencias de los mínimos coinciden muy aproximadamente con las frecuencias propias de dos tubos de longitudes iguales a la de la rama y la del tramo de tubo principal entre a y b cuyos extremos estuviesen ambos cerrados o abiertos.



Figuras 4a y 4b

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método de cálculo temporal para el tubo de Herschel-Quincke que conduce a unos resultados plausibles. El método es extensivo a filtros constituidos por asociaciones en paralelo y serie de este tipo de tubos.

BIBLIOGRAFÍA

Barjau, A.; Cardona, S.; Jordi, L. (1990) "Fast simulation of the internal pressure in a double-reed woodwind", Editions de la Maison des Sciences de l'Homme, 13(1), 159-178.

Martínez, J.; Agulló, J.; Cardona, S. (1988) "Conical Bores. Part II: Multiconvolution", J. Acoust. Soc. Am. 84(5), 1620-1627.

Munjál, M. L. (1987) "Acoustics of Ducts and Mufflers", John Wiley and Sons, New York.

Nederveen, C.J.; Bruijn, A. (1967) "Hoel calculations for an oboe", Acustica, 18, 47-57.