

Modelo de control activo de transmisión de ruido a través de una apertura en pared delgada

I.Magnusson^a, T. Pàmies^a, J. Romeu^a & R. Arcos^a

^a *Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de Catalunya de Chile, Colom 11, Terrassa, España, jordi.romeu@upc.edu*

RESUMEN: La reducción activa de ruido transmitido a través de una apertura se investiga mediante un modelo teórico. El campo primario se compone de una onda plana que incide sobre una apertura rectangular situada en una pared infinita de grosor despreciable. El sonido radiado por la apertura se calcula a partir de la ecuación de radiación de Rayleigh una vez se han aplicado las condiciones de continuidad de presión y velocidad de partícula en la apertura. El modelo propuesto se compara con un modelo BEM del mismo problema con objeto de su validación. Una vez validado, la aplicación del control activo se realiza mediante la inclusión de una fuente secundaria cercana a la apertura que por superposición de campos acústicos minimiza el sonido transmitido en la región de radiación. Se presentan resultados de atenuación respecto a la frecuencia y dimensión de la apertura.

KEYWORDS: Control, activo, ruido, apertura.

1. INTRODUCCIÓN

La técnica de control activo de ruido tiene como uno de los principales inconvenientes la limitada área de atenuación para la mayoría de casos prácticos aparte de conductos. Una posible estrategia para superar esta limitación consiste en la posibilidad de actuar sobre los cuellos de botella de los caminos de propagación [1], como puede ser, por ejemplo, el control activo aplicado en aperturas existentes en cerramientos, en que la mayor parte del ruido transmitido se propaga a través de la propia apertura. Existen experiencias previas de control activo en aperturas combinando elementos pasivos y activos, aplicados a ruido de escape de un generador [2] consiguiendo resultados apreciables hasta 400 Hz. Otro ejemplo es lo que los autores denominaron *hybrid window* [3], en el que la apertura practicada en una pared se alarga transformándola en conducto. En ambos casos, el ruido incidente es forzado a propagarse a través de un conducto lo que simplifica la geometría del problema a un caso de una dimensión lo que favorece la aplicación del control activo. Siguiendo la misma estrategia, Chen [4] estudió de forma teórica el control activo de ruido transmitido por un conducto instalado en un cerramiento. Este tipo de solución, aunque efectiva, ocupan en general demasiado espacio para determinadas aplicaciones como encapsulamientos industriales o ventanas de fachadas.

Emms et al [5] estudió de forma teórica el caso más exigente de control activo en apertura practicada en pared delgada (comparado el grueso del cerramiento con la longitud de onda). Mediante la técnica de los elementos de contorno planteó tres tipos diferentes de estrategias de control en función de la ubicación y comportamiento de la fuente secundaria, siendo la estrategia más efectiva la de cancelar la presión sonora en un punto cercano a la apertura. Esta estrategia fue posteriormente confirmada de forma experimental por Romeu et al. [6]. Nishimura et al [7] también han demostrado la viabilidad del control activo de transmisión desde el exterior hacia el interior de un recinto, considerando tanto fuentes primarias fijas como móviles.

Esta comunicación se enmarca dentro de un proyecto de realización de un modelo analítico de control activo de ruido transmitido a través de una apertura en una pared delgada infinita, utilizando una estrategia de control local. El objetivo en primer término consiste en cancelar la presión en el área definida por la apertura y se limita en el rango de baja frecuencia en el que la pared puede asumirse como delgada tal y como demuestra Serizawa [8]. El modelo presentado incluye una fuente secundaria sita en el lado de incidencia y un micrófono de error sito en el plano definido por la apertura. Previo al cálculo de la eficiencia del control activo, el modelo analítico se compara con un modelo BEM para conocer el rango válido de frecuencias de aplicación.

2. TEORIA

La geometría del problema abordado se muestra en la Fig. 1. El origen de coordenadas está localizado en el centro de la apertura cuadrada de lado a . En la región $x < 0$, el campo primario está constituido por una onda progresiva que incide normal u oblicuamente sobre la apertura juntamente con la onda reflejada por la propia apertura. El modelo propuesto es una simplificación del estudio de ruido radiado por aperturas practicadas en paredes delgadas en recintos paralelepédicos [9,10] por lo que es acosejable remitirse a estas referencias para un

mayor detalle del modelo. Lo que resulta nuevo en este caso es que el sonido incidente no es el campo modal que se forma en un conducto o recinto si no la propia onda plana. En consecuencia, y asumiendo la dependencia temporal de $e^{j\omega t}$ para todos los campos sonoros, la onda incidente es:

$$P_i = \widehat{P}_i e^{jk(y \sin \theta_1 \cos \phi_1 + z \sin \theta_1 \sin \phi_1 + x \cos \theta_1)} \quad (1)$$

en la que θ_1 y ϕ_1 son los ángulos de incidencia del campo primario (ver Fig. 1) y k es el número de onda. La presión en la región $x < 0$ es la suma de las ondas incidente y reflejada y si la superficie no es completamente rígida, la presión en esta región se puede expresar como [11]

$$P^- = \frac{2 \cos \theta_1}{\beta_1 + \cos \theta_1} \widehat{P}_i e^{jk(y \sin \theta_1 \cos \phi_1 + z \sin \theta_1 \sin \phi_1 + x \cos \theta_1)} \quad (2)$$

donde β_1 es la admitancia acústica específica de la apertura. La presión en la región $x > 0$ se expresa como:

$$P^+ = -\frac{ik\rho c}{2\pi} \iint u_0(y', z') \frac{e^{ikR}}{R} dy' dz' \quad (3)$$

donde $R = \sqrt{x^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$ y

$$\begin{aligned} y' &= -a/2 < y' < a/2 \\ z' &= -a/2 < z' < a/2 \end{aligned} \quad (4)$$

$u_0(y', z')$ es la velocidad de partícula normal a la apertura y R es la distancia entre la fuente puntual de sonido sobre la apertura y el punto de medición.

Estando definidas las expresiones para la presión en ambos lados de la división, se aplican condiciones de continuidad para la presión y la velocidad de partícula en la apertura. Finalmente, la velocidad de partícula (normal) se puede relacionar con la presión mediante la admitancia acústica específica β de la superficie de la apertura. La aplicación de estas condiciones de contorno en la expresión de la admitancia de la apertura causada por el campo primario da lugar a [9,10]

$$\int_{S_{op}} e^{ikR_1} dy' dz' = -ik\beta_1 \int_{S_{op}} \int_{S_{op}} e^{ikR_1} \frac{e^{ikR}}{2\pi R} dy' dz' dy dz \quad (5)$$

en la que $R_1 = y' \sin \theta_1 \cos \phi_1 + z' \sin \theta_1 \sin \phi_1$. La ecuación (5) se soluciona mediante integración numérica de Gauss con el fin de obtener la impedancia específica. Conocida ésta, se puede obtener la presión y velocidad de partícula en la apertura y, finalmente, el sonido radiado en la región $x > 0$.

Aplicando ahora el principio de superposición para la introducción de la fuente secundaria responsable del control activo, el campo en la región $x < 0$ se define como la suma de los campos primarios y secundarios, tanto en el caso de ondas incidentes como reflejadas. La presión en un punto cualquiera de la apertura se define consecuentemente como:

$$P_e(r_e) = \frac{2 \cos \theta_1}{\beta_1 + \cos \theta_1} \hat{P}_i e^{ikR_1} + \frac{2 \cos \theta_2}{\beta_2 + \cos \theta_2} Z_2 q \quad (6)$$

en concreto, $P_e(r_e)$ es la presión en la posición en la que se puede ubicar el micrófono de error (siempre contenido en el plano de la apertura) y Z_2 es

$$Z_2 = -\frac{ik\rho c}{4\pi R_2} e^{ikR_2} \quad (7)$$

donde R_2 es la distancia entre la fuente secundaria y el micrófono de error. El poder q de la fuente secundaria es tal que anula la presión en el micrófono de error.

3. VALIDACIÓN NUMÉRICA

Previo al cálculo de la eficiencia de la estrategia de control activo propuesta, se procede a validar el modelo de transmisión sonora a través de una pared delgada. El problema de la Fig. 1 se resuelve para solamente el campo primario mediante el método numérico de elementos de contorno, conocido normalmente como el método BEM. Una fuente primaria se coloca suficientemente lejos de la apertura para considerar que el frente de onda que incide sobre la misma es plano. La apertura se considera cuadrada de lado $a = 0.3$ m situada en una pared lo suficientemente grande como para evitar el efecto de la difracción por sus límites. Se calculan 45 casos diferentes, dentro del rango de frecuencia comprendido entre 100 y 500 Hz y para un ángulo de incidencia θ (Fig. 1) entre 0° to 80° . El ángulo ϕ se mantiene constante y nulo para todos los cálculos al igual que se mantiene constante el poder de la fuente primaria en 0.0182N/m^2 . Este mismo escenario de cálculo se repite mediante el modelo analítico propuesto y se comparan los resultados.

Se elige como el parámetro a comparar el índice de transmisión de a apertura, definido como

$$T = 10 \log \left(\frac{\dot{W}_i}{\dot{W}_t} \right) \quad (8)$$

siendo \dot{W}_i la potencia incidente que a su vez se calcula mediante la expresión:

$$\dot{W}_i = I_i \cdot S_{\text{apertura}} \quad (9)$$

Donde S_{apertura} es la superficie de la apertura y finalmente I_i es la intensidad incidente estimada a partir de la presión incidente calculada en campo libre p_i y de la impedancia específica del aire ρc .

4.1 Resultados

Se calcula la eficiencia del control activo de ruido para diferentes distancia entre la fuente secundaria y el micrófono de error, considerando siempre que $\theta_2 = \phi_2 = 0$. La Fig. 2 muestra el valor de la reducción sonora del ruido transmitido por la apertura cuando la onda primaria incide perpendicularmente a la superficie ($\phi_1 = \theta_1 = 0$). La gráfica muestra que la transmisión disminuye conforme aumenta la distancia entre la fuente secundaria y el micrófono de error, r_{sc} , aunque esto es a costa de un incremento en el poder de la fuente secundaria.

Guo [13] estableció que la dimensión de la zona de atenuación se incrementa con la distancia entre la fuente secundaria y el micrófono de error. El mapa de presión sonora en la apertura ($a = 0.3$ m) para 200 Hz y $\phi_1 = \theta_1 = 0$ se muestra para dos distancias r_{sc} distintas en la Fig. 3. En ella se observa claramente que la zona de atenuación se incrementa efectivamente al incrementar la distancia r_{sc} , lo que sugiere que la eficiencia de la cancelación depende de la capacidad de superposición de los frentes de onda primario y secundario en el área de la apertura. Efectivamente para distancias más cercanas de la fuente secundaria a la apertura, el frente de onda llega más curvado a la apertura y la superposición con el frente (plano) primario de onda es menor. Esto se ve en la misma figura 2 para diferentes dimensiones (normalizadas) de la apertura.

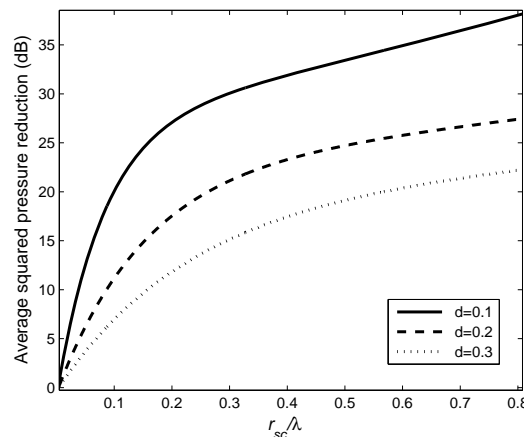


Figure 2: Mean attenuation versus normalized distance between secondary source and error microphone r_{sc}/λ for three different normalized aperture dimensions $d = a/\lambda$.

El incremento de la distancia r_{sc} comporta en general un incremento de la atenuación del sonido transmitido. Sin embargo, para incrementos mayores a $r_{sc}/\lambda > 0.2$ no hay una reducción sustancial de transmisión, seguramente debido a que el frente de onda secundaria es lo suficientemente plano en la superficie de la apertura a esta distancia y la interferencia entre campos primario y secundario ya tiene lugar de forma casi óptima.

Finalmente, el efecto de la frecuencia se muestra en la Fig. 4, en la que se representa el valor de R respecto la distancia r_{sc} para la apertura cuadrada de lado $a = 0.30$. Se observa que la atenuación se reduce conforme se incrementa la frecuencia y es esperable que a partir de una cierta frecuencia ya no se produzca atenuación alguna.

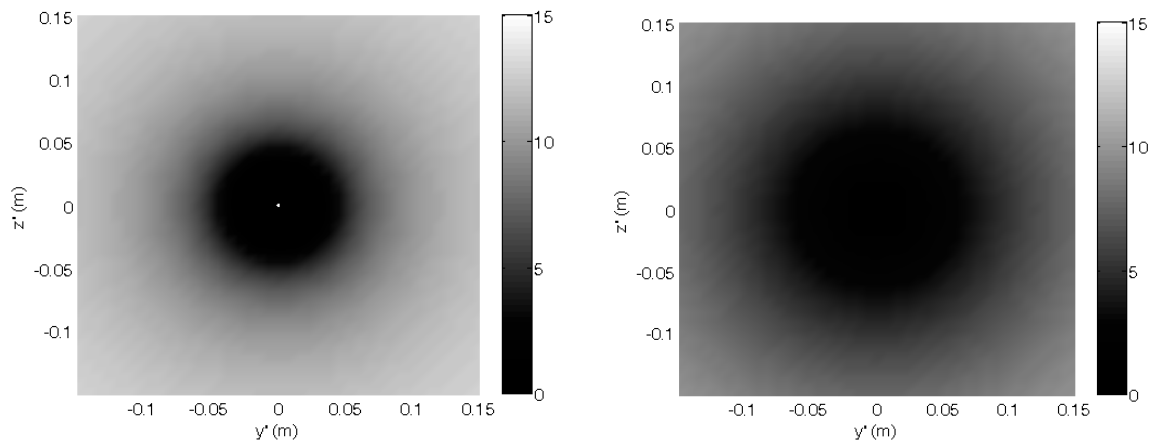


Figure 3: Sound pressure level (in dB) at the aperture after active control for (a) $r_{sc}=0.05$ m, (b) $r_{sc}=0.15$ m.

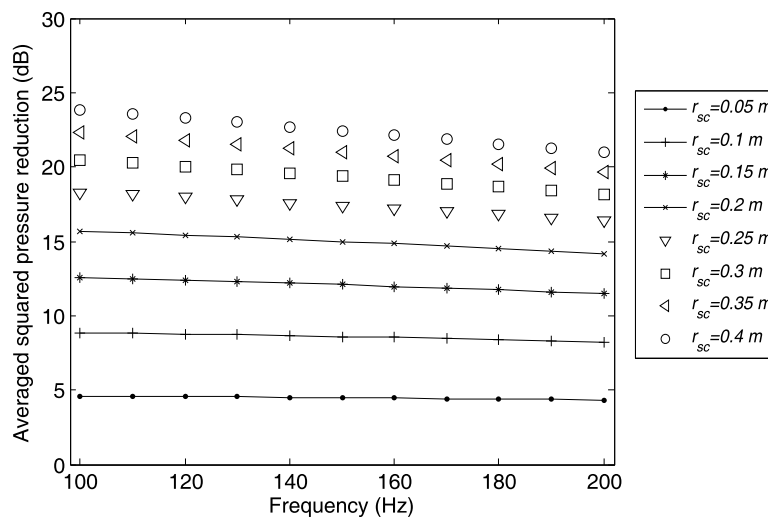


Figure 4: Active reduction R versus frequency for different distances of r_{sc} for an aperture dimensions of $a=0.3$ m.

5. CONCLUSIONES

Esta comunicación muestra los resultados preliminares de un modelo en desarrollo de control activo de transmisión sonora a través de una apertura. En primer lugar se muestra una comparativa del cálculo de índice de transmisión sonora para una apertura calculado mediante el modelo propuesto y mediante el conocido método de los elementos de contorno. Los resultados son muy parecidos (error menor a 1 dB) en el rango de frecuencia entre 200 Hz y el límite superior de frecuencia en esta comunicación que es de 500 Hz para una apertura de lado $a = 0.3$. Estos resultados validarían el modelo analítico propuesto para el rango de baja y

media frecuencia a falta de determinar los motivos de las diferencias en el rango de muy baja frecuencia.

El modelo se aplica entonces al cálculo del control activo de transmisión a través de una apertura mediante la adición de una fuente secundaria de poder ajustado a la cancelación de presión en el punto medio de la apertura (donde se ubica el teórico micrófono de error). Se presentan los resultados el rango entre 200 y 500 Hz para la apertura cuadrada de lado $a = 0.3$ y se confirma que la estrategia de control ensayada comporta una atenuación apreciable en la región de emisión sonora sin que se detecten incrementos de presión sonora en esa región. En términos generales, la atenuación activa se incrementa conforme se aumenta la distancia entre la fuente secundaria y la ventana hasta el límite útil de $r_{sc}/\lambda = 0.2$ y disminuye conforme aumenta la frecuencia. El mecanismo de cancelación es la superposición de ondas primaria y secundaria en la superficie de la apertura y el rendimiento del sistema de control activo depende de la curvatura que el frente de onda secundario presenta en la superficie de la apertura.

6. AGRADECIMENTOS

El proyecto de investigación se desarrolla bajo el soporte económico del Plan Nacional de Investigación (proyecto BIA2011-24633).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Johnson, “How big is your head? A discussion of system complexity, active control, acoustic arrays and virtual acoustic prototyping”, on the CD-ROM: Proceedings of Active 2006. Adelaide, 2006.
- [2] M. Cuesta, P. Cobo “Optimisation of an active control system to reduce the exhaust noise radiated by a small generator”. Appl. Acoust., 62(5), 513-526, 2001.
- [3] J. Maillard, C. Guigou-Carter, P. Ducruet, C. Martin “Hybrid window for natural ventilation in buildings near airports” on the CD-ROM: Proceedings of Euronoise 2006. Tempere, 2006.
- [4] K. Chen “An adaptive active control of sound transmission through an aperture at low frequencies” Appl. Acoust., 46, 153-174, 1995.
- [5] G.W. Emms, C. Fox, “Control of sound transmission through an aperture using active sound absorption techniques: a theoretical investigation” Applied Acoustics, 62, 735-747, 2001.
- [6] J. Romeu; S. Jiménez; R. Capdevila; N. Díaz, “Reduction of noise transmission through an aperture using active feedforward noise control” J. Acoust. Soc. Am. 111, 41-45, 2002.
- [7] M. Nishimura, T. Murao, N. Wada “Basic study on active acoustic shielding: phase 2 noise reducing performance for a small open window” on the CD-ROM: Proceedings of Internoise 2010. Lisbon, 2010.
- [8] H. Serizawa and K. Hongo, “Evaluation of an acoustic plane wave transmitted through a rectangular hole in a thick hard screen”, Wave Motion 36, 103–117, 2002.
- [9] T. Pàmies, J. Romeu, M. Genescà and A. Balastegui, “Sound radiation from an aperture of a rectangular enclosure under low modal conditions,” J. Acoust. Soc. Am. 130(1), 239–249, 2011.
- [10] T. Pàmies, J. Romeu, R. Arcos, S. Martin, “Analytical Simulations on Active Control of Sound Transmission Through an Aperture in a Rectangular Enclosure”. Acta Acustica United w. Acustica. 100; 277 – 284, 2014
- [11] Morse and K.U. Ingard, Theoretical Acoustics (Princeton University Press, New Jersey, 1986), pp. 366-379.
- [12] ISO 3741:2010. Acoustics -Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure.

[13] J. Guo, J. Pan, C. Bao, "Actively created quiet zones by multiple control sources in free space" *J. Acoust. Soc. Am.* 101(3), 1492-1501, 1997.