TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

INFLUENCIA DEL ACOPLO FLUIDO-ESTRUCTURA EN LA RESPUESTA MODAL DE UN CAMPO ACÚSTICO

PACS: 43.20.Tb

Tejado Mata, Javier[1]; Simón Hidalgo, Francisco[2]
[1] Escuela Politécnica, UEM
C. Tajo s/n
Villaviciosa de Odón,
28670 Madrid, España
Tlf.: +34 912 115 611
[2] Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información, CSIC
C. Serrano 144
28006 Madrid, España
Tlf.: +34 915 618 806

E-Mail: javier.tejado@uem.es[1]; f.simon@csic.es[2]

ABSTRACT
Present theories about space modal distribution at low frequencies in a room are based on both low acoustic absorption and no coupling between the sound field and its boundaries. These models are important in the design of rooms when the acoustic aspect is to be taken into account and even essential for small rooms or the frequencies involved and the size of the room are or the same order of magnitude. If the room is made of light elements the coupling air-structure can play a role and, as a consequence sound field within the room can be noticeably changed. In this work, the coupling between sound field and structure is considered and its influence on the modal response of the room studied.

RESUMEN
Las teorías existentes en la actualidad que explican la distribución modal en baja frecuencia en un recinto están basadas en la existencia de baja absorción acústica y la ausencia de acoplo entre el campo sonoro y las superficies límite. Estos modelos son importantes en el diseño de salas para uso acústico e imprescindibles cuando su volumen es pequeño o cuando la frecuencia y el tamaño de sala son del mismo orden. Cuando el recinto está construido con materiales ligeros, el acoplo aire-estructura empieza a jugar un papel y la respuesta del campo acústico se puede ver fuertemente modificada. En este trabajo se considera este acoplo y se estudia su influencia en la respuesta modal del recinto

INTRODUCCIÓN

Un aspecto importante en el diseño de recintos, desde el punto de vista acústico, es su geometría. Ésta afecta a varios aspectos del campo acústico que se forma en su interior y, por tanto, a las prestaciones que puede ofrecer. En general se puede decir que afecta a la difusión del campo en su interior, que a su vez presenta diferentes aspectos como pueden ser la focalización del sonido, su homogeneidad espacial, zonas que producen scattering, coloración del sonido, etc. Cuando se trata de recintos de gran tamaño, la distribución espacial del sonido

y la presencia de ecos suelen ser la mayor preocupación. Sin embargo, en recintos de pequeño tamaño es la respuesta modal del recinto la que juega un papel clave en el funcionamiento del recinto desde el punto de vista acústico. En las bajas frecuencias, la relación entre el tamaño del recinto y las longitudes de onda involucradas hace que la densidad modal sea muy baja y que, además, su importancia (amplitud) pueda no ser de valor equiparable entre ellas. El resultado es que en este rango de frecuencias el comportamiento acústico está regido por modos aislados de amplitud muy diferente y situados en zonas concretas del recinto. La consecuencia desde el punto de vista acústico es que el recinto se comporta de manera heterogénea en todo su volumen con zonas en las que se percibe un mayor –o menor– nivel de presión sonora, que la propia sala puede dar preferencia a ciertos tonos –coloración– y que, además, este comportamiento depende de las posiciones del emisor y del receptor.

Dado que la física del problema hace imposible tanto la adición de modos extra en las bandas de frecuencia afectadas como la presencia de modos dominantes, las estrategias adoptadas para el diseño de recintos se basa en la selección de geometrías que favorezcan un reparto homogéneo de los modos en las bandas de frecuencia en todo el rango espectral de trabajo. Uno de los primeros trabajos que aborda este problema fue realizado por Bolt [1], en él trata de distribuir de manera lo más homogénea posible los modos del recinto, para ello utiliza la bien conocida ecuación de los modos resonantes de un recinto paralelepipédico:

$$\omega_o(n_x, n_y, n_z) = \pi c \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \qquad (1)$$

donde n_x, n_y y n_z son números enteros que indican el orden del modo, ω_o es la frecuencia angular del modo y L_x, L_y y L_z las longitudes de las tres aristas del recinto. Muchos trabajos posteriores se han basado en este trabajo y muchos diseñadores han utilizado su principal resultado: la relación entre aristas 1:1.25:1.6 como la base de sus diseños.

Otros autores [2-5] han seguido el mismo camino y han buscado criterios que permitan encontrar las proporciones del recinto que ofrezcan una distribución más homogénea de los modos en el rango espectral de trabajo. Algunos introdujeron procedimientos de optimización como [2] y [3] y otros muestran como incluso el aumento de la frecuencia no asegura una distribución homogénea de los modos naturales del recinto [5]. Todos estos procedimientos asumen formas paralelepipédicas de recinto ya que en caso contrario no se podría obtener una ecuación explícita de los modos de la sala y ninguno de los procedimientos anteriores sería viable. Cuando la sala no tiene dicha forma, se buscan recintos rectangulares que se aproximen y se admite que la respuesta del recinto será una aproximación de la solución. Otro problema añadido es que, como ya se ha mencionado, la respuesta depende de la posición emisor receptor. De acuerdo a ellas no todas los modos serán excitados y por tanto los resultados de los procedimientos anteriores pueden resultar sesgados.

Posteriormente Cox [6] propuso un método de diseño de recintos basado en la obtención de las relaciones entre aristas que ofrezcan la respuesta en frecuencia lo más plana posible para una posición de emisor y receptor dadas. De esta horma no se basa en la distribución homogénea de la base modal del recinto sino en que la respuesta en el punto de recepción sea lo menos distorsionada posible (o lo más fiel posible a la fuente). Su método propone dos modelos distintos de cálculo, uno basado en la descomposición modal del recinto:

$$p(\omega, \boldsymbol{r}) = \sum_{n=1}^{N} \frac{A_n}{\omega_n^2 - \omega^2 + jB_n} \qquad (2)$$

en la que *p* es la presión sonora en un punto dado, $\boldsymbol{r}$, A_n es función de las formas modales y B_n depende de la impedancia en las fronteras del recinto. n es un mero contador que incluye los modos en los tres ejes y, por tanto, está relacionado con la terna (n_x, n_y, n_z).

El segundo modelo que propone está basado en el método de las imágenes fuente [7], se basa en la teoría de rayos y, en general, es más rápido que el anterior.

Una vez que ha modelado el recinto mediante uno de estos métodos –él utiliza el segundo– utiliza un parámetro de coste para optimizar la respuesta del modelo en el que las longitudes de las aristas del recinto son variables y las posiciones de emisión y recepción son fijas. De este modo está optimizando las geometría del recinto para una condiciones de uso dadas. Dado que lo que se persigue es obtener una respuesta lo más plana posible, la función de coste que utiliza y debe minimizar es:

$$\chi = \sum_{j=1}^{J}\left(L_{p,j} - mf_j + b\right)^2 \qquad (3)$$

siendo $L_{p,j}$ la respuesta, expresada en nivel a la frecuencia f_j, y m y b los coeficientes de la recta que mejor aproxima la respuesta.

En todos los modelos descritos anteriormente las propiedades físicas de la frontera se obvian o se limitan, en la práctica, a su absorción. Esta aproximación es suficientemente buena para la mayor parte de los casos en los que los recintos son de tamaño medio y sus paredes y forjados poseen suficiente masa. Sin embargo, para recintos pequeños con paredes ligeras el acoplo que se produce entre el recinto y la estructura que lo crea puede ser suficientemente fuerte para que la respuesta modal de la sala se vea afectada. Este inconveniente se podría subsanar en algunos casos, imponiendo en toda su frontera una impedancia adecuada que tenga en cuenta este fenómeno, sin embargo la obtención de esta magnitud no es fácil ni experimentalmente ni teóricamente. Una alternativa es crear un modelo que incluya as paredes como un elemento más del mismo, de forma que se pueda integrar en el proceso de optimización.

En este trabajo se estudia la influencia de paredes ligeras sobre la respuesta de un recinto de pequeño tamaño para evaluar su importancia y, en consecuencia la necesidad de tenerlas en cuenta en el proceso de optimización. Para ello se desarrollará un modelo de elementos finitos que incluya como subsistemas tanto la cavidad como cada una de las paredes y se evaluará su efecto en la función de coste.

FORMULACIÓN DEL MODELO

El sistema bajo estudio es un sistema compuesto por una cavidad rellena de fluido (aire) rodeada por una estructura formada por placas planas con las que está en contacto. Por tanto nuestro modelo se rige por las ecuaciones del movimiento de ambos sistemas:

$$M_s\ddot{q} + K_s = f_s + f_{bs} \qquad (4a)$$

$$M_f\ddot{p} + K_f = f_f + f_{bf} \qquad (4b)$$

donde los subíndices s y f hacen referencia a los dominios estructural y fluido, respectivamente; M es la masa equivalente del sistema; K la rigidez equivalente; f_s y f_f las fuerzas ejercidas sobre la estructura y el fluido y f_{bj} un término que tiene en cuenta el acoplo entre ambos dominios. Ambos dominios están relacionados mediante dos condiciones de acoplo, uno dinámico y otro cinético:

$$\sigma\vec{n}_s = -p\vec{n}_s \qquad (5a)$$

$$\nabla p\vec{n}_f = -\rho_o\ddot{q}\vec{n}_f \qquad (5b)$$

siendo σ la tensión en la estructura, *p* la presión en el fluido y ρ_o la densidad del fluido. Acoplando las ec. (4) con las ec. (5) se tiene que el sistema acoplado se rige por el sistema de ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} M_s & 0 \\ -\rho_o c_o C_c^T & M_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q}_s \\ \ddot{q}_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_s & C_c \\ 0 & K_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_s \\ q_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_s \\ f_f \end{pmatrix} \quad (6)$$

siendo c_o la velocidad de propagación del campo acústico en el fluido y C_c un coeficiente de acoplo en la frontera entre los dos medios. Este tipo de formulación conduce a modelos muy grandes que requieren de grandes recursos de computación, necesidad que podría ser relajada si se utilizara un modelo de elementos de frontera para la cavidad, pero estamos interesados en conocer la respuesta media en todo el recinto. La gran cantidad de puntos en los que se calcula el campo de presiones compensa el esfuerzo de cálculo empleado.

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ESTRUCTURA

El objetivo esencial de este trabajo es la evaluación de la influencia de la estructura que da forma al recinto en la respuesta del mismo. Para alcanzar dicho fin no es necesario implementar un proceso de optimización basta con utilizar el procedimiento propuesto en [6] (que no tiene en cuenta la estructura) y desarrollar un estudio paramétrico sobre las características de la estructura del que se obtenga χ para cada caso, la comparación de los valores de la función de coste nos da información sobre la importancia de la estructura en el resultado (de optimización).

El procedimiento utilizado es el siguiente. Se determina la geometría óptima para un recinto de pequeño volumen de acuerdo a las directrices de [6]. Después, se construyen modelos para un conjunto de casos que incluyen diferentes geometrías –incluyendo la del caso obtenido como óptimo–, diferentes paredes –se utiliza un único material y se varía su espesor– y diferentes posiciones emisión-recepción. A continuación se determina la respuesta del sistema para todos los casos y, por último, a partir de ella se obtiene el valor de la función de coste de cada caso.

	L_x, m	L_y, m	*d*, mm
Recinto 1a	2.5	4.1	–
1b	2.5	4.1	20
1c	2.5	4.1	40
Recinto 2a	2.9	3.5	–
2b	2.9	3.5	20
2c	2.9	3.5	40
Recinto 3a	3.2	3.2	–
3b	3.2	3.2	20
3c	3.2	3.2	40

Tabla 1. Características de los recintos estudiados. L_x y L_y son las longitudes de las aristas del plano horizontal, *d* es el espesor de las paredes.

Dado que nos centramos en recintos de pequeño tamaño, en todos ellos se decidió fijar el volumen, V = 20 m^3 y la altura L_z = 2 m. El material de las placas con que se supone hechas las paredes es aglomerado de madera. El resto de las propiedades relevantes se muestran en la tabla 1.

RESULTADOS

Los resultados del estudio se resumen en la figura 1. En esta figura se muestra la respuesta en nivel, las frecuencias modales, la línea recta de mejor ajuste utilizada para el cálculo de los residuos y el valor de éste. Se observa que las respuestas de los recintos donde no se han considerado las paredes el número de modos es menor, así como, naturalmente, su densidad modal, también se observa como, efectivamente, la distribución de modos a lo largo del eje de frecuencias es más homogéneo en este caso. Las placas aportan parte de sus modos al recinto de forma que la respuesta de éste es más densa modalmente de lo que se esperaría en un estudio de estas características.

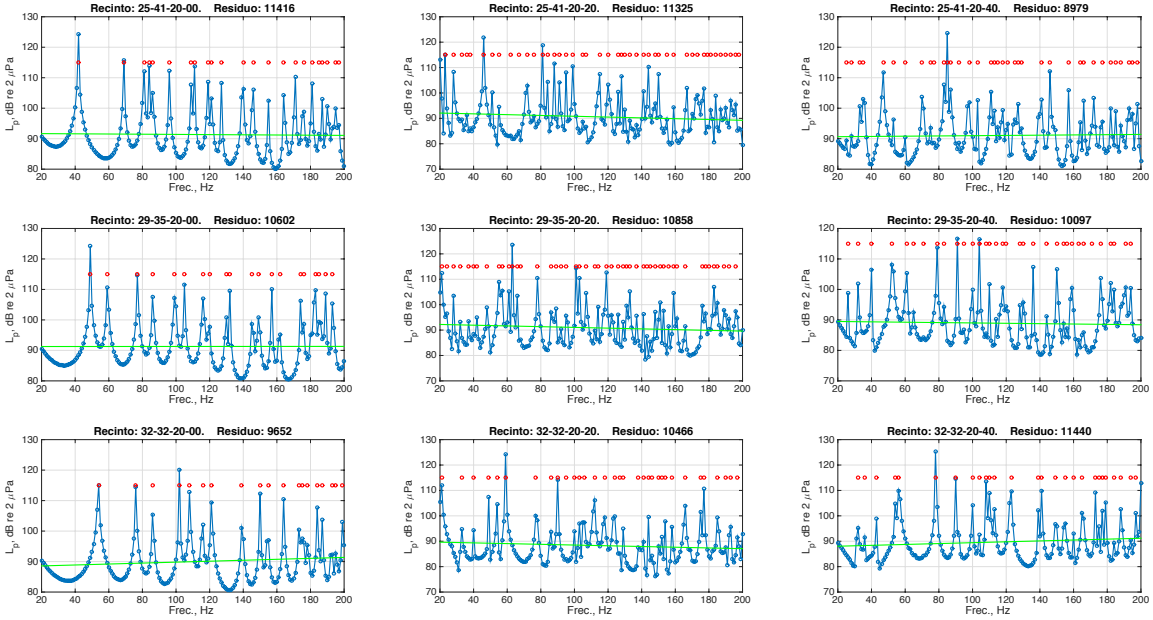

Figura 1. Respuesta en frecuencia de los recintos estudiados. Se muestran además las frecuencias modales y el valor del residuo.

En la tabla 2 se ofrecen los valores de los residuos para cada caso. Se puede ver que el comportamiento en función del espesor de las placas es diferente en cada caso. En el recinto 1 la puntuación disminuye cuando aumenta el espesor, indicando la ventaja de instalar paredes gruesas. En el recinto 3 la tendencia es la contraria, los resultados indican que en este caso sería mejor elegir recintos con paredes lo más delgadas posibles. El recinto 2 también conduce a la elección de paredes gruesas pero con una tendencia diferente a la del recinto 1. La razón reside en el hecho de que la geometría influye en la posición de los modos del recinto y el espesor en los de las placas y la fortaleza del acoplo es función de la posición y amplitud relativa entre ambos, por lo que ambas magnitudes deben tenerse en cuenta en un estudio exhaustivo.

		d, mm		
		–	**20**	**40**
L_x x L_y m	**2.5*x*4.1**	11416	11325	8979
	2.9*x*3.5	10602	10858	10097
	3.2*x*3.2	9652	10466	11440

Tabla 2. Valor de los residuos para los casos indicados

Se debe señalar que la puntuación del caso designado como base del estudio –recinto 2 sin paredes– es superior a la puntuación del recinto 3. El procedimiento utilizado aquí no se basa en el estudio de la base modal completa de los recintos, sino en el estudio de un respuesta del sistema en la que no tienen por qué haberse excitado toda su base modal. El conjunto concreto de los modos excitados dependerá de las posiciones elegidas para las fuentes y los receptores. Como ya se ha dicho, para elegir el caso de referencia se utilizaron las posiciones emisor-receptor propuestas en [6], mientras que los resultados resumidos en la figura 1 y la tabla 2 se obtuvieron utilizando otras posiciones emisor-receptor. Este resultado ilustra que efectivamente este par de parámetros es importante y que mediante este procedimiento lo que se optimiza es el recinto para un uso concreto definido por el par emisor –receptor.

Obsérvese también que las dimensiones de las aristas horizontales del recinto 3 (el de mejor puntuación) son iguales. En general, este caso se suele considerar como perjudicial ya que en las aproximaciones clásicas este hecho implica que los modos axiales en los ejes *X* e *Y* coinciden dando lugar a modos degenerados fuertes que, además perjudican la homogeneidad espectral. La razón por la que los resultados parecen contradecir esta regla se basa también en el argumento anterior: a pesar de partir de un recinto con una geometría *a priori* deficiente las posiciones emisor-receptor (y en menor medida el espesor de las paredes) han sido capaces de contrarrestar esta deficiencia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la influencia de las paredes en el campo acústico de un recinto y se ha mostrado que, para recintos pequeños y paredes ligeras, su efecto es apreciable y debería tenerse en cuenta.

Se ha esbozado un procedimiento de diseño para este tipo de salas que tiene en cuenta el uso que se le vaya a dar y que es aplicable a cualquier geometría (no solo paralelepipédica). En este sentido se debe reconocer que para recintos de tamaño apreciable la carga computacional determinaría el límite práctico.

También se muestra que mediante el manejo adecuado de los parámetros del problema (configuraciones de uso de la sala, elementos constructivos de los que está hecha), se pueden contrarrestar las posibles debilidades de su diseño geométrico en casos en que sobre éste existan restricciones arquitectónicas.

REFERENCIAS

[1] R. H. Bolt, “Note on The Normal Frequency Statistics in Rectangular Rooms,” J. Acoust. Soc. Am., vol. 18, pp. 130–133 (1946).
[2] M. M. Louden, “Dimension Ratios of Rectangular Rooms with Good Distribution of Eigentones”, Acustica 24, 101–104 (1971).
[3] C. L. S. Gilford, “The Acoustic Design of Talk Studios and Listening Rooms”, J. Audio. Eng. Soc. 27, 17–31 (1979).
[4] O. J. Bonello, “A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes”, J. Audio. Eng. Soc. 29, 597–606 (1981).
[5] A. Moreno, J. Ruiz, C. de la Colina, “Re-visiting Bolt’s criterion for homogeneous distribution of normal frequencies in rectangular enclosures”, Proc. TecniAcústica (2000)
[6] T.C. Cox, P. D’Antonio, M.R. Avis, “Room Sizing and Optimization at Low Frequencies”, J. Audio Eng. Soc., 52, (2004).
[7] S. Ortiz, p. Cobo, L. Gonzalez, D. Rodriguez, V. Theofilis, “Acoustic resonances in a 3D open cavity. Comparison of experimental and numerical results, Proc. Internoise (2012)