

OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LA MEDIDA DEL CAMPO ACÚSTICO EN RECINTOS A BAJA FRECUENCIA: ESTUDIO PRELIMINAR

PACS: 43.55.+p

David K. Anthony¹, Francisco Simón²

DAEND – Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
c/ Serrano 144
28006 Madrid, Spain.
Tel: +34 91 561 8806

E-mail: iaca344@ia.cetef.csic.es¹, f.simon@csic.es²

Resumen

Actualmente se está interesado en la caracterización del aislamiento acústico de salas en el rango de la baja frecuencia. Esta caracterización se encuentra con problemas derivados de la carencia de difusión y otros parámetros que hacen que se pierda la capacidad de aplicar los modelos de alta frecuencia habituales. Sin embargo, dado que estos modelos son muy prácticos y están muy bien especificados interesa encontrar la manera de adaptarlos introduciendo modificaciones que permitan su uso en condiciones fiables. En este trabajo se un algoritmo de recocido simulado en la búsqueda de posiciones de medida óptimas con respecto al campo sonoro en los recintos. Se tienen en cuenta no solo la distribución espacial de los puntos de medida sino también el rango de dimensiones de los recintos de medida.

Palabras-clave: transmisión acústica ; baja frecuencia ; optimización numérica ; recocido simulado

Abstract

Currently there is interest in characterizing the acoustic insulation of rooms at low frequencies. This presents difficulties due to the lack of diffusion among other problems that reduce the sufficiency of common high-frequency models. However, given that these models are practical and well-defined it would be fruitful to adapt them to allow their use in a reliable way. Here, a simulated annealing algorithm is applied in order to find optimum measurement positions for the sound field within rooms, specifically considering the distribution of the measurement points and variability in the dimensions of the room under measurement.

Keywords: acoustic transmission, low frequency, numerical optimization, simulated annealing

1. Introducción

En la actualidad los métodos de medida utilizados para la caracterización acústica de las prestaciones de los edificios y de los elementos constructivos se basan en la medición del nivel de presión acústica en los recintos. Estos métodos (por ejemplo normas de medida ISO 10140 o ISO 16283) se basan en la relación entre la presión sonora de un campo acústico difuso y la potencia acústica de la fuente sonora que lo causa. Para el rango de frecuencias habitual de interés y para volúmenes de recinto superiores a 50 m³, es razonable suponer la existencia de

este campo acústico. Sin embargo para frecuencias o volúmenes de recinto inferiores la aproximación de alta frecuencia en la que se basa el unos de campos difusos ya no se cumple y, como consecuencia, entre otras cosas el campo acústico ya no es homogéneo en todo el recinto, por lo que las directrices ofrecidas en las normas de medida antes citadas (y casi cualquier otra actual) pueden presentar divergencias respecto de los valores reales de niveles de presión medio en los recintos a esas bajas frecuencias.

En recintos pequeños la dimensión menor del recinto suele ser del orden o incluso inferior que el valor de las longitudes de onda involucradas. Además, su pequeño tamaño y su mobiliario hacen que no se pueda suponer que la probabilidad de que el sonido incidente que cada punto del recinto sea independiente de la dirección de incidencia. Todo ello explica porqué no puede existir campo difuso y los procedimientos habituales no pueden ser utilizados. Este problema no es nuevo y ha sido estudiado extensamente [1,2,3]. En su estudio surgen dos problemas principales, uno es que la respuesta está dominada por los modos de la sala debido a que su densidad modal es muy baja y otro que la relación entre el nivel de presión media en el recinto no tiene por que tener la misma relación con la potencia incidente sobre la pared medianera que la que tiene un campo difuso.

Debido a que el formalismo utilizado hasta ahora ha demostrado ser muy práctico, tanto como los procedimientos de medida derivados de él, la línea de trabajo principal intenta adaptar los formalismos existentes a la nueva situación. Se buscan configuraciones que permitan estimar el valor medio del campo sonoro en el recinto para la nueva situación en la que se sabe que éste no es homogéneo en todo su interior. En la bibliografía sobre este tema se puede encontrar como es esperable que en los rincones del recinto los valores sean consistentemente altos a la vez que próximos a ese valor medio que se busca. Sin embargo cuestiones prácticas desaconsejan su uso. Al final las últimas propuestas sugerían promediar los valores de nivel de presión acústica de los rincones con un promedio espacial del resto del recinto.

En el presente trabajo se presenta un estudio preliminar en el que se estudian aquellas configuraciones de medida que ofrecen valoraciones del campo lo más homogéneas posible. De esta forma se esperan localizar sesgos (si los hubiera) sobre las zonas del recinto más favorables para la caracterización del campo a baja frecuencia. En el estudio se incluyen los rincones de forma que se pueda valorar la importancia de su inclusión en los procedimientos de medida o la posible elaboración de alternativas.

El estudio se basa en el uso de un algoritmo de recocido simulado para la búsqueda de los valores que minimizan la función objetivo que en nuestro caso será la colección de valores relativos de la energía acústica en las diferentes posiciones de medida de un ensayo. El estudio se realizará tanto para diferentes valores del número de posiciones de medida como para diferente número de posiciones de fuente.

2. Recocido simulado

El algoritmo de recocido simulado (SAA, [4]) (simulated annealing algorithm en inglés) es un algoritmo de búsqueda estocástico que se puede aplicar para encontrar soluciones óptimas, las cuales son aproximaciones a la solución óptima global. Se aplica cuando el problema abordado es demasiado alto computacionalmente para realizar una búsqueda exhaustiva y otros métodos como los basados en gradientes no son aplicables debido a la naturaleza de la superficie de búsqueda (por ejemplo si es multimodal y si tiene muchas soluciones óptimas locales).

El SAA pertenece a una familia de algoritmos de búsqueda que se basan en fenómenos reales (en este caso el enfriamiento lento de materiales) y se aplican cuando los métodos tradicionales no son adecuados. Otro algoritmo común en problemas de gran número de mínimos locales es el de un algoritmo genético (GA, genetic algorithm en inglés) [5], el cual es más complejo pero más completo ya que busca un conjunto de soluciones en paralelo. Sin embargo, para problemas combinatorios, como será nuestro caso, el GA no ofrece grandes ventajas (ver [6] como ejemplo).

En principio el funcionamiento de un SAA es sencillo. Se empieza con una solución inicial (generada aleatoriamente) y se evalúa el rendimiento de ésta. Luego se repite la siguiente en un bucle: se hace un cambio aleatorio a la solución actual y se evalúa su rendimiento. Si se produce una mejora en el rendimiento se acepta incondicionalmente la nueva solución como la solución actual, y se repite otro bucle. En caso contrario, se acepta la nueva solución como la actual con una probabilidad p_{acc} o se mantiene la actual, y se repite otro bucle. El valor de p_{acc} varía con el ensayo de optimización, se empieza con un valor de 0.5 y se acaba con un valor de 0.025 siguiendo una función exponencial con exponente negativo. Esto permite que se explore la superficie de búsqueda en diferentes puntos no correlativos de ninguna manera al principio del ensayo, al tiempo que se concentra mucho en las mejoras al final (búsqueda local) del mismo. La mejor solución encontrada durante el ensayo se usa como solución óptima. Debido a la naturaleza estocástica de un SAA, éste se repite un conjunto dado de veces.

En los resultados presentados aquí se usaron un número de 2000 evaluaciones. Ensayos previos mostraron que con este número se conseguía un grado de convergencia suficiente. Para cada escenario considerado se realizaron 10 optimizaciones de SAA.

3. Optimización

Se usan 16 salas con un volumen de 80m^3 , y con sus dimensiones (L_x , L_y , L_z) según las relaciones $L_x:L_y$ y $L_y:L_z$ con valores $\{1:1.121, 1:1.242, 1:1.362, 1:1.483\}$.

Las posiciones candidatas de los micrófonos se definen mediante una malla de $5 \times 5 \times 5$ con una distancia entre posiciones a lo largo de cada dimensión con un factor de 0.15 de la longitud de la sala en este sentido, como se muestra en la figura 1a. Además, en algunos casos se utilizaron posiciones adicionales de micrófono directamente en las esquinas de las salas, o en alejadas de ellas por un factor de 0.08 de la longitud de la sala en el eje correspondiente. Las posiciones candidatas de las fuentes se definen por una malla de $2 \times 5 \times 5$ con una distancia entre posiciones a lo largo de cada dimensión con un factor de 0.2 y con un factor de 0.1 en el eje z , como se muestra en la figura 1b.

La tabla 1 resume los tres casos de posiciones candidatas de micrófonos que se consideran y los códigos que se usan abajo para hacer referencia a ellos.

La solución de las posiciones de medida y las fuentes (en algunos casos) están representadas por una cadena de números, donde cada número representa la posición de uno de los micrófonos en la solución. Las posiciones de las fuentes también son representadas y añadidas a la cadena de micrófonos. Los cambios aleatorios que se realizan en el SAA consisten en reemplazar solo un elemento (que representa un micrófono o una fuente) en la cadena.

Código	Numero de posiciones de micrófonos	Resumen
NC	125	Malla de posiciones candidatas de 5x5x5
C00	133	Caso NC más 8 micrófonos justo en las esquinas de las salas
C08	133	Como C08, pero los posiciones en las esquinas se desplazan un factor de 0.08 hacia el interior de la sala

Tabla 1 . Resumen de los tres casos de posición de medida y los códigos que hacen referencia a ellos.

4. Función de coste

El valor que se usó como base de la optimización es el determinado por una función de coste. En este caso se representa la variabilidad en las señales medidas por los micrófonos bajo la variación de las dimensiones del recinto, para cada solución evaluada.

Primero, se evalúa la presión a un punto, \mathbf{r} , en una sala debido a una fuente ubicada en \mathbf{s} :

$$p(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \omega) = i \frac{\omega Q \rho c^2}{V} \sum_n \frac{\psi_n(\mathbf{r}) \psi_n(\mathbf{s})}{\Lambda_n (\omega_n^2 - \omega^2 - 2i \delta_n \omega_n)}, \quad (1)$$

donde ω es la frecuencia angular, Q la fuerza de la fuente, c la velocidad del sonido, ρ la densidad de aire, V el volumen de la sala, n es el índice de modo, ω_n la frecuencia natural de modo, Λ_n es un factor de normalización, δ_n el factor de amortiguamiento modal, y ψ_n son las funciones formas de modo para la sala.

Cada solución especifica las posiciones de los micrófonos y de las fuentes (donde existan). Siguiendo normativas vigentes (por ejemplo [7,8]), se mide la presión cuadrada en bandas de octavos de frecuencias, $\langle \omega \rangle_i$. Aquí se usan las octavos con frecuencias centrales: {20, 40, 80, 160, 315} Hz, cada una se calcula usando más de 300 puntos de frecuencia. Se calcula una función, x , que representa la presión cuadrada para cada banda de frecuencia, promediada sobre todos los micrófonos y fuentes especificadas en una solución evaluada:

$$x(a, i) = p^2 \left(\mathbf{r}_j, \mathbf{s}_k, \langle \omega \rangle_i, a \right)_{j,k}, \quad (2)$$

La meta de la optimización es encontrar un conjunto de micrófonos (y fuentes) tal que el coeficiente de variación en x de sus bandas de frecuencias que mínimo. Si la solución global es J_o , su valor se define como:

$$J_o = \min_{j,k} \max_i \left(\frac{\hat{\sigma} \left(\left(x(a, i) \right)_a \right)}{\left(x(a, i) \right)_a} \right), \quad (3)$$

En la práctica, la optimización es una de tipo min-max: minimizar la máxima variación de la presión cuadrática medida en las bandas de frecuencia, con las posiciones de los micrófonos y fuentes como variables de la optimización.

5. Resultados

Se investigaron escenarios para números de micrófonos, m , de {3, 5, 7}, y número de fuentes, s , de {0, 1, 2}. Cuando $s = 0$, la forma del modo de la fuente, $\psi_n(s)$ en la ec. (1), es el valor unidad. El motivo para utilizar $s = 0$ es optimizar la posición de los micrófonos independientemente de la posición de la fuente. En la realidad podría representar un fuente de tipo bocina en el origen de la sala.

En la tabla 2 se muestra el número de combinaciones que existen para la tarea de optimización para escenarios con $s = 0$. Se observa que con $s = 1$ el número de combinaciones multiplica los valores dados por 50, y para $s = 2$ se lo multiplica por 49x50.

Numero de micrófonos (m)	Numero de combinaciones	Tiempo de eval. [días] (para 1s / eval.)
3	317,750	3.7
5	2.35×10^8	2714
7	7.97×10^{10}	9.25×10^5

Tabla 2. Numero de combinaciones y el tiempo de evaluación en días (para evaluaciones de un segundo) para escenarios con $s = 0$ y 133 posiciones candidatos de micrófonos.

En el escenario ($m = 3, s = 0$) es factible usar una búsqueda exhaustiva para la obtención de la solución. Esto permite evaluar el rendimiento del SAA. En la figura 2, se muestra la distribución de resultados de la búsqueda exhaustiva para este escenario y para los tres casos de posiciones de micrófono (NC, C00, C08 – ver la tabla 1). Además, se muestran los resultados del SAA mediante puntos, en cada caso. Se ve que aunque hay una variación pequeña entre los resultados de cada optimización en todos los casos se encontraron soluciones muy cerca de la solución global. Cada uno de ellas cae en el percentil 10^{-5} (o inferior) de la distribución correspondiente, y se consiguió mediante 2,000 evaluaciones, donde la búsqueda exhaustiva llevo al menos 150 veces más evaluaciones. Se ve que como el número de micrófonos aumenta mucho esta diferencia.

Para analizar los resultados de las optimizaciones del SAA de todos los casos que se consideraron, se dibujan los valores promedio de cada optimización junto a sus valores individuales. Esto se muestra en la figura 3 donde se grafican los resultados con m y s como el variable independiente. Además, para los casos C00 y C08, se muestran el número de veces que micrófonos con posiciones en las esquinas aparecen en las soluciones.

En la figura 3a se puede observar que, en general, la variabilidad de la función de coste J (el valor medio promediado de p^2) disminuye con el aumento del número micrófonos. Esto se nota en la media de las 10 evaluaciones de cada caso, y observando los valores individuales en cada caso se nota que además son estadísticamente diferentes para los escenarios de $s = 0$. Para $s = \{1,2\}$ la diferencia disminuye cuando el número de fuentes aumenta.

Se observa que para $s = 0$ todas las soluciones especifican un micrófono en una posición de esquina (para los casos de C00 y C08). Cuando $s = 1$, las posiciones de esquina también aparecen menos, pero no en todas las soluciones. Y con $s = 2$, las esquinas aparecen menos que en el caso anterior. Para los escenarios de $s = \{1,2\}$, si el algoritmo da varias soluciones con puntos en las esquinas utiliza más los puntos inscritos en ellas (C00) más que los excéntricos (C08).

La figura 3b representa los mismos resultados de otra manera. Aquí es fácil ver, en general, que es mejor usar escenarios de o bien $s = 0$ o bien $s = 2$, aunque para $s = 0$ y el caso NC no hay ventaja sobre los casos C00 y C08.

6. Conclusiones

Se ha estudiado de forma preliminar las soluciones óptimas para las posiciones de micrófonos (puntos de medida) y las fuentes para reducir la variabilidad en la estimación del campo acústico a baja frecuencia, cuando hay variabilidad en las dimensiones de la sala. Esto ha permitido identificar algunas tendencias en las ubicaciones de micrófonos y fuentes. En particular, se mostró el beneficio de ubicar éstos en las esquinas, y bajo qué condiciones, y cuál es el número de fuentes óptimo.

El problema abordado es complejo y de forma altamente combinatoria. Se ha justificado el uso de algoritmos de recocido simulado (simulated annealing algorithm, SAA), y el estudio de una versión reducido del problema ha permitido evaluar el rendimiento del SAA.

Agradecimientos

El primer autor colaboró en este trabajo durante un Permiso de Estancia en el ITEFI-CSIC.

Referencias

- [1] W. Kropp, A. Pietrzyk, and T. Kihlman, "On the meaning of the sound reduction index at low frequencies", *Acta Acustica* 2, 379–392 (1994).
- [2] C. Simmons, "Measurement of sound pressure levels at low frequencies in rooms. comparison of available methods and standards with respect to microphone positions", *Acta Acustica united with Acustica* 85, 88–100 (1999).
- [3] C. Hopkins and P. Turner, "Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies", *Applied Acoustics* 66, 1339 – 1382 (2005)
- [4] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", *Science* 220, 671-680 (1983)
- [5] D.E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning", Cambridge MA: Addison-Wesley (1989)
- [6] H.K. Baek, S.J. Elliott, "Natural Algorithms for choosing Source Locations in Active Control Systems", *Journal of Sound and Vibration*, 186(2), 245-267 (1995)
- [7] ISO 10140:2010, "Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Parts 1 to 5", (2010)
- [8] ISO/DIS 16283-1, "Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation", (2012)

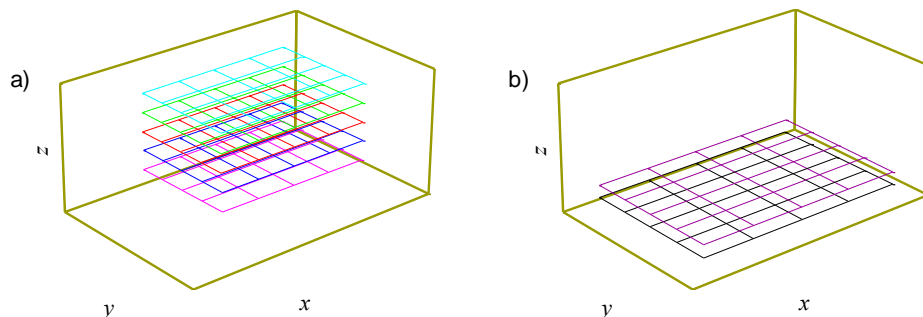


Figura 1. Mallas de las posiciones candidatas para los micrófonos (a) y las fuentes (b).

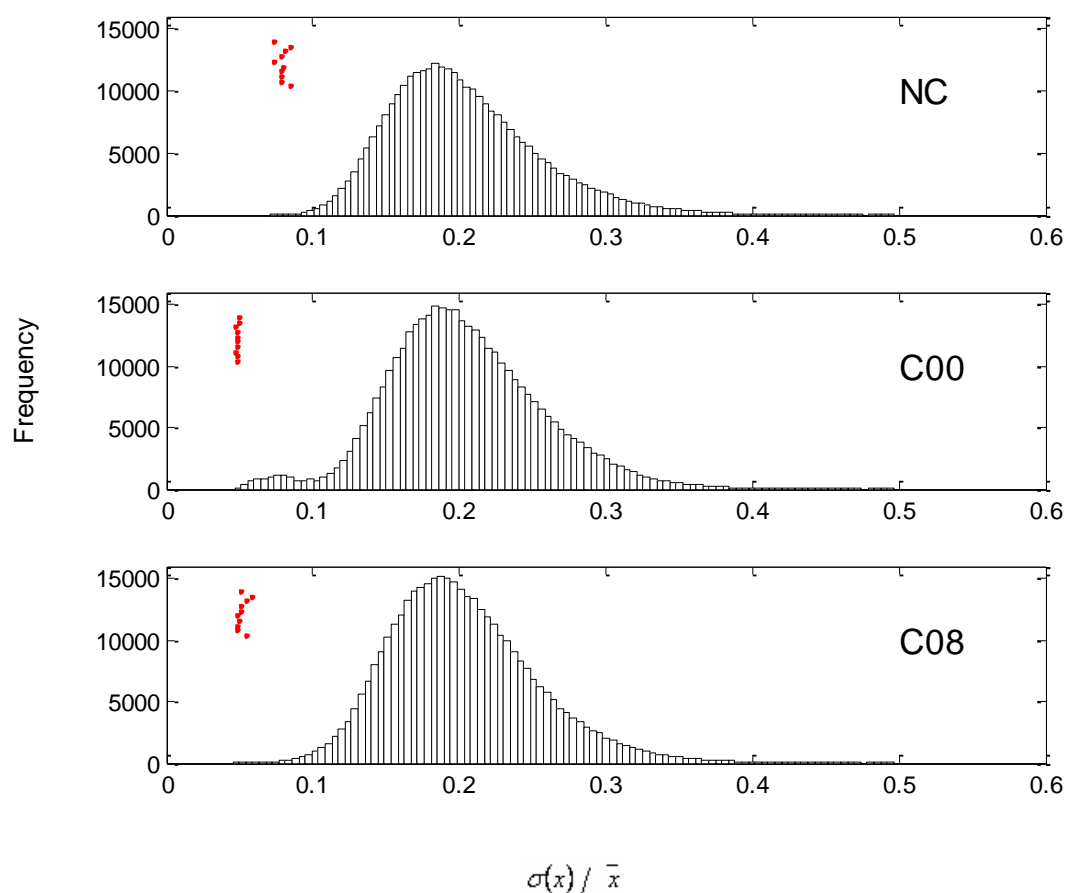


Figura 2. Histogramas para el escenario $m = 3$ y $s = 0$ para los casos NC, C00 y C08, según descripción en el texto. También se muestran los resultados de los 10 ensayos del SAA para cada caso.

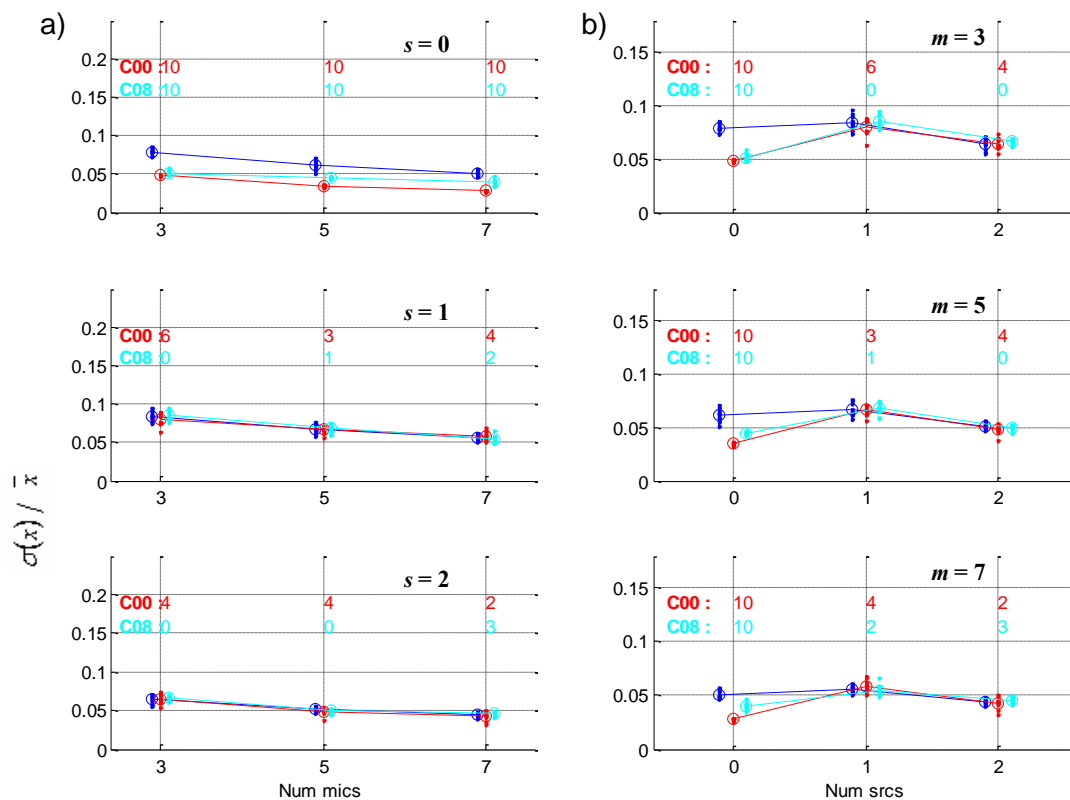


Figura 3. Los resultados de los ensayos de las optimizaciones, dibujados contra a) el número de micrófonos (m) y, b) el número de fuentes (s). También se muestran el número de fuentes ubicadas en las esquinas para los casos C00 y C08. (Clave: NC — ; C00 — ; C08 —)