

## PREDICCIÓN, MEDIDA Y ANÁLISIS DE LA RESPUESTA EN BAJAS FRECUENCIAS DE UNA SALA DE GRABACIÓN

PACS: 43.55.Ka, 43.55.Br

Valencia, A.; San Martín, R.; Ezcurra, A.; Arana, M.  
Universidad Pública de Navarra. Departamento de Física.  
Campus de Arrosadia. 31006. Pamplona. Spain  
Tel.: 948 168451  
Fax: 948 169565  
E-mail: ana.valencia@unavarra.es

**Palabras clave:** modos propios, acústica en salas, predicción NPS, aplicación Matlab.

### ABSTRACT

In small rooms, at frequencies lower than Schroeder's where the modal density is low, interference phenomena generate irregular responses, causing a coloration dependent on the receiver's position. An analytical prediction based on rigid boundary conditions is often the main tool for its evaluation. In this communication the pressure values obtained both analytically and by a measurement procedure for different conditioning configurations of a recording room are discussed. For the tasks of prediction, measurement, analysis and representation an application created for the purpose in Matlab is presented.

### RESUMEN

En recintos pequeños, para frecuencias inferiores a la frecuencia de Schroeder donde la densidad modal es baja, fenómenos de interferencia generan respuestas irregulares, provocando una coloración dependiente de la posición de registro. Una predicción analítica basada en condiciones de frontera rígida suele ser la principal herramienta para su evaluación. En esta comunicación se discuten los valores de presión obtenidos tanto de forma analítica como mediante un procedimiento de medida para diferentes configuraciones de acondicionamiento de una sala de grabación. Para las tareas de predicción, medida, análisis y representación se presenta una aplicación en Matlab creada al efecto.

### 1. INTRODUCCIÓN

Cuando las dimensiones de un recinto son comparables a las longitudes de onda de las frecuencias excitadas en el mismo se originan interferencias por la interacción entre las ondas incidentes y las reflejadas. Dichas interferencias pueden ser constructivas o destructivas, sumándose en el primer caso y cancelándose en el segundo, obteniéndose máximos y mínimos de presión acústica en la sala [1]. Las ondas estacionarias generadas de esta manera se conocen

como modos propios y se relacionan con unas determinadas frecuencias, llamadas frecuencias propias o de resonancia. Cuando estos modos propios no se distribuyen uniformemente en el espectro frecuencial sino que se concentran en bandas de frecuencia estrechas se produce una coloración del sonido en la sala dependiente de la posición de escucha. Esto es habitual en recintos pequeños con paredes reflectantes en los que las bajas frecuencias del espectro audible tienen longitudes de onda comparables a sus dimensiones.

Para llevar a cabo la predicción analítica de la respuesta de una sala ortoédrica se parte de la ecuación de Helmholtz [2]:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (1)$$

Se busca a continuación el conjunto de soluciones válidas simplificadas derivadas de la suposición de condiciones de frontera rígida [3]. Así, se parte de que en las superficies de la sala se cumple que la componente normal de la velocidad de partícula es nula y existe un máximo de presión absoluta o, de manera equivalente, la primera derivada de la presión en cada dirección es igual a 0. Se obtienen así las funciones propias de la sala  $p_{n_x n_y n_z}$  así como sus frecuencias propias  $f_{n_x n_y n_z}$ , dependientes de un conjunto de valores  $k_{n_x n_y n_z}$ :

$$p_{n_x n_y n_z} = C \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right) \quad (2)$$

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2\pi} k_{n_x n_y n_z} \quad (3)$$

$$k_{n_x n_y n_z} = \pi \left[ \left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

siendo  $n_x, n_y, n_z$  índices enteros,  $L_x, L_y, L_z$  las dimensiones de la sala y  $c$  la velocidad de propagación en el aire. Además del amortiguamiento, es necesario incluir la excitación para poder obtener una solución formal a la ecuación de ondas de partida. Para este modelo teórico y empleando el caso más simple, el de una fuente puntual situada en  $r_o$ , se obtiene finalmente la siguiente función de transferencia para cada posición  $r$  [4]:

$$p_\omega(r) = \rho_o c^2 \omega Q \sum_n \frac{p_n(r) p_n(r_o)}{[2\delta_n \omega_n + j(\omega^2 - \omega_n^2)] K_n} \quad (5)$$

donde  $Q$  es la velocidad de volumen,  $\delta_n$  la constante de amortiguación y  $\omega_n = 2\pi f_n$  la frecuencia angular de resonancia de cada modo.

Una vez alcanzada la aproximación teórica de la respuesta de una sala interesa definir un método para conocer los valores reales de la misma. La opción más intuitiva es la realización de medidas en posiciones equiespaciadas repartidas por todo el volumen de la sala; no obstante, se trata de un método costoso, tanto más cuanto mayores sean las dimensiones de la sala y/o la frecuencia máxima que se quiera analizar. Existe una propuesta de un método de predicción que requiere la realización de un número de medidas más limitado: la predicción a partir de los NPS obtenidos en los ejes X, Y y Z de la sala [5].

Se define en primer lugar una esquina de la sala como origen de coordenadas. Las tres aristas que confluyen en dicho punto son los ejes X, Y y Z del sistema y sobre los mismos se define un conjunto de puntos de medida. El espaciado entre éstos depende de la frecuencia máxima que interese analizar. Una vez conocidos los NPS en dichos puntos, basta con aplicar reiteradamente la siguiente ecuación para calcular los niveles en el resto de posiciones de la sala:

$$p(x, y) = p(x_{ref}, y_{ref}) \cdot \frac{p(x, y_{ref})}{p(x_{ref}, y_{ref})} \cdot \frac{p(x_{ref}, y)}{p(x_{ref}, y_{ref})} \quad (6)$$

La ecuación anterior permite obtener los NPS de un plano a partir de dos ejes. Si el método de predicción descrito es efectivo los resultados del mismo deben ser similares a los obtenidos mediante medidas, aunque pueden diferir de las aproximaciones teóricas debido a las condiciones reales de la sala, que pueden alejarse de las de frontera rígida, a la presencia de equipamiento en la misma y a la fuente sonora empleada en el procedimiento práctico.

## 2. MÉTODO

### 2.1 Sala objeto de estudio

El estudio se realiza en una sala de ensayo para música acondicionada con paneles de material absorbente cuyas dimensiones son  $L_x = 5,15$  m,  $L_y = 2,98$  m y  $L_z = 2,58$  m, resultando un volumen de  $39,6$  m<sup>3</sup>. A la hora de analizar la respuesta de la sala se focaliza la atención en el rango frecuencial de 40 a 120 Hz, puesto que la sala se emplea principalmente para grabar secciones rítmicas de jazz con batería y bajo y los principales causantes del efecto conocido como *low frequency booming* en un estudio de grabación emiten dentro de este rango [6]: la frecuencia fundamental del bombo de la batería se sitúa entre 60 y 80 Hz; el timbal base, entre 80 y 120 Hz; y la quinta cuerda del bajo eléctrico, por ejemplo, recorre el rango B1 (61,7 Hz) – B2 (123 Hz).



Figura 1. Aspecto de la sala completamente equipada (izquierda) y solo con material absorbente (derecha).

La sala fue acondicionada durante su construcción mediante la colocación de un conjunto de paneles absorbentes móviles repartidos por las cuatro paredes. Con el fin de analizar el efecto de dichos paneles se caracterizó la sala mediante medidas basadas en el standard ISO 3382 con cobertura de ingeniería en tres configuraciones diferentes: sala equipada, sala sin mobiliario pero con paneles absorbentes y sala vacía sin acondicionamiento.

Tabla I.  $T_{30}$  (s) en bandas de tercio de octava para el rango de frecuencias analizado.

	40	50	63	80	100	125	160	200	$T_{mid}$ (500-2kHz)
<b>Sin absorbente</b>	2,8	2,3	1,7	1,3	1,1	1,0	0,6	0,6	1,0
<b>Con absorbente</b>	2,8	2,1	1,6	1,2	1,0	0,8	0,5	0,4	0,2
<b>Equipada</b>	1,2	1,1	1,0	0,6	1,0	1,8	0,8	0,6	0,2

Como se observa en la Tabla I, a las frecuencias de interés el material absorbente empleado no supone una variación relevante de los tiempos de reverberación. Es el equipamiento de la sala, armarios, asientos e instrumentos musicales, el que provoca una disminución importante a las frecuencias más bajas. Destaca el pico de 1,8 s que aparece en la configuración de sala equipada a 125 Hz. Se deduce que se trata de una resonancia de uno de los elementos de la batería,

probablemente un parche del timbal base. La Tabla II muestra los modos y frecuencias propias de la sala calculados a partir de sus dimensiones según las ecuaciones (3) y (4).

Tabla II. Modos y frecuencias propias presentes en la sala inferiores a 120 Hz.

<i>frec (Hz)</i>	<i>Nx</i>	<i>Ny</i>	<i>Nz</i>	<i>Modos</i>	<i>frec (Hz)</i>	<i>Nx</i>	<i>Ny</i>	<i>Nz</i>	<i>Modos</i>
<b>33.0</b>	1	0	0	Axial	<b>93.2</b>	1	1	1	Oblicuo
<b>57.1</b>	0	1	0	Axial	<b>93.3</b>	2	0	1	Tangencial
<b>65.9</b>	0	0	1	Axial	<b>99.0</b>	3	0	0	Axial
<b>65.9</b>	1	1	0	Tangencial	<b>109.3</b>	2	1	1	Oblicuo
<b>66.0</b>	2	0	0	Axial	<b>114.1</b>	0	2	0	Axial
<b>73.7</b>	1	0	1	Tangencial	<b>114.3</b>	3	1	0	Tangencial
<b>87.2</b>	0	1	1	Tangencial	<b>118.8</b>	1	2	0	Tangencial
<b>87.3</b>	2	1	0	Tangencial	<b>119.0</b>	3	0	1	Tangencial

Posicionando la fuente sonora en una esquina de la sala se logra la máxima excitación de los modos [1], y su máxima percepción, situando el receptor igualmente esquinado, como se observa en la Figura 2, que compara las respuestas entre esa situación y una correspondiente a un punto de la sala interior en el rango de frecuencias analizado.

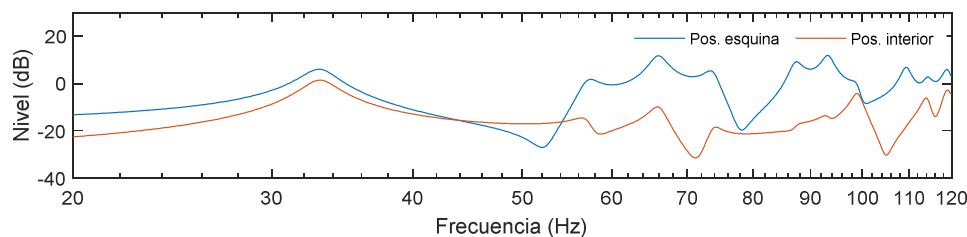


Figura 2. Distribución modal de la sala en dos posiciones: la esquina identificada como el origen de coordenadas (azul) y una posición interior (roja).

Este tipo de representación permite evaluar qué posiciones se verán más afectadas por los distintos modos propios. Así por ejemplo, en la Figura 3 se analiza la respuesta en 3 puntos interiores de la sala: P1 (4m 2m 1,2m), P2 (3,6m 1,4m 1,2m) y P3 (3m 0,8m 1,2m). Al superponer las distribuciones de los tres y analizar el rango en el que se encuentran los modos axiales (Tabla II), se puede observar cómo el punto P3 presenta el mínimo nivel en el axial 100 (33,0 Hz), puesto que en esta dimensión es la posición más centrada de las tres en la dimensión Lx, mientras que el P2 presenta el mínimo para el axial 010 (57,1 Hz) por la misma razón en la dimensión Ly. Cuando en torno a una frecuencia se localizan varios modos propios la predicción de la variación de la respuesta de la sala en esa zona se vuelve muy compleja. Esto ocurre con los modos propios 001, 110 y 200 situados los tres cerca alrededor de los 66 Hz.

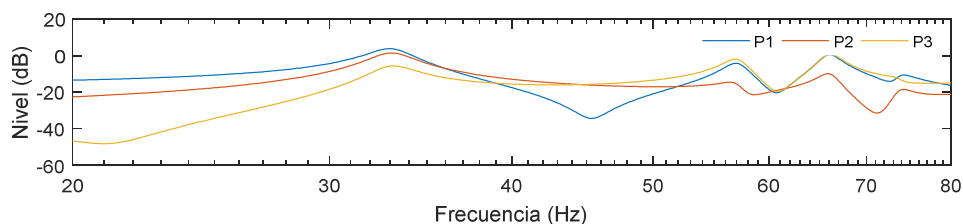


Figura 3. Distribuciones modales obtenidas en tres posiciones de receptor interiores.

El análisis mostrado hasta el momento es válido para salas con una única posición de fuente, pero en esta sala es habitual la presencia de diferentes fuentes localizadas en distintas posiciones (por ejemplo: bombo, timbal o amplificador de bajo). En este punto las

representaciones anteriores pueden resultar insuficientes y se hace necesaria una representación gráfica más versátil como la propuesta en la aplicación desarrollada en este proyecto.

## 2.2 Aplicación software

Se ha desarrollado una aplicación en Matlab que permite estimar niveles a partir de una descripción geométrica de la sala basándose en la solución analítica, realizar medidas en cualquier punto de la sala y predecir niveles en el resto de la sala a partir del conjunto de medidas realizadas. El motor de la aplicación es la herramienta ITA Toolbox desarrollada en el Instituto de Acústica de la RWTH Aachen University [7].

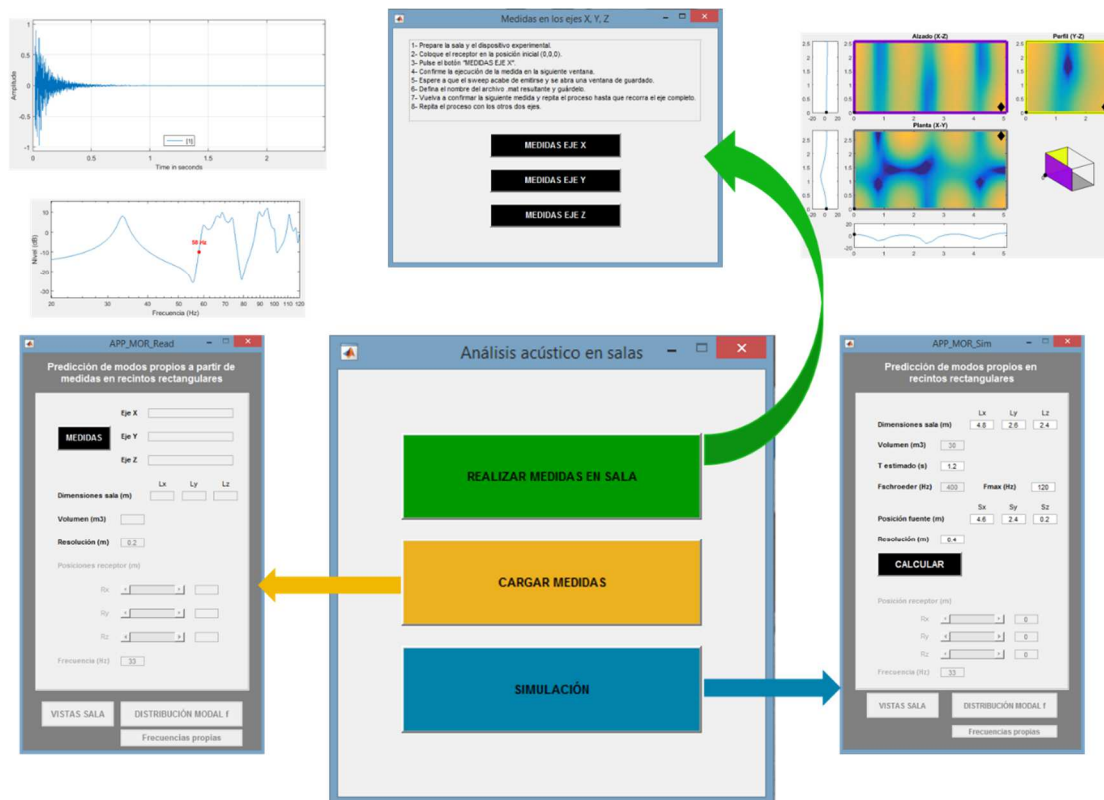


Figura 4. Esquema de la aplicación desarrollada.

La aplicación cuenta con herramientas de visualización gráfica detalladas, que permiten representar tanto la distribución modal de la sala en una posición de receptor determinada como una representación tridimensional de los niveles de presión sonora para una frecuencia dada (representación en tres planos – planta, perfil y alzado – junto con las distribuciones espaciales en los ejes X, Y y Z referenciados al receptor).

## 2.3 Dispositivo de medida y metodología

Los elementos empleados para realizar las medidas fueron: fuente dodecaédrica DO12 de 01 dB, amplificador Electro-Voice Q44-II, interface de audio Digidesign VX, micrófono omnidireccional GRAS 40 AC con fuente de alimentación Norsonic type 335 y ordenador portátil con el software Matlab v.2017a instalado.

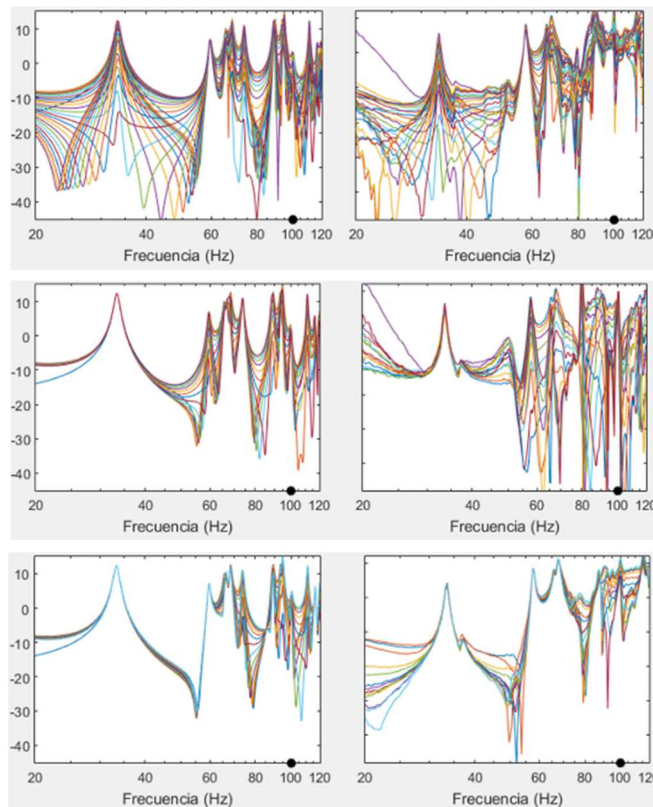
Una vez designada la esquina origen de referencia, se situó la fuente en la esquina inferior opuesta. Para que el procedimiento fuera más fluido, se marcaron previamente de forma equiespaciada las posiciones de receptor en la sala. Su control se automatizó a través de la



aplicación descrita que genera un sweep logarítmico, lo emite y almacena las respuestas al impulso obtenidas para cada el receptor, permitiendo repetir el procedimiento en cada una de las posiciones establecidas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Estimaciones teóricas vs medidas



*Figura 5. Valores en las posiciones de los ejes X (arriba), Y (centro) y Z (abajo) obtenidos mediante predicción analítica (izquierda) frente a las medidas (derecha).*

En la Figura 5 se comparan los valores de los ejes obtenidos mediante predicción analítica frente a los medidos. Se distinguen claramente los dos primeros modos propios, los axiales 100 y 010 (33 Hz y 57,1 Hz respectivamente), mediante el análisis de la variación de las gráficas con la posición del receptor en cada uno de los ejes. Cuando todas las gráficas coinciden en nivel en una frecuencia significa que el índice correspondiente a ese eje es nulo, mientras que si las gráficas varían entre un máximo y un mínimo, el índice de ese eje será mayor o igual a 1 (dependiendo del número de gráficas con nivel mínimo). Observando las gráficas en torno a 33 Hz se detecta la coincidencia en nivel en los eje Y y Z y la variación en el eje X, que se corresponde con el modo axial 100. Lo mismo ocurre a 57,1 Hz con el modo 010.

Mediante esta representación se prueba la validez de la aproximación a las condiciones de frontera rígida empleada en la predicción analítica, puesto que existe un gran parecido entre las gráficas obtenidas con este método y las procedentes de medidas reales. Si bien estas últimas presentan mayor variabilidad, el parecido es mayor a frecuencias muy bajas, donde los modos propios aparecen más aislados.

### 3.2 Representación “planta-perfil-alzado” de modos propios

Con el micrófono situado en una esquina se detectan los diferentes modos propios con claridad, como ocurre en el ejemplo mostrado en la Figura 6.izda que representa la respuesta de la sala bajo una excitación a 109,3 Hz (modo 211). Sin embargo, al trasladarlo a una posición interior donde la influencia del modo es menor, la respuesta a esa frecuencia es diferente, lo que puede visualizarse en la Figura 6.dcha.

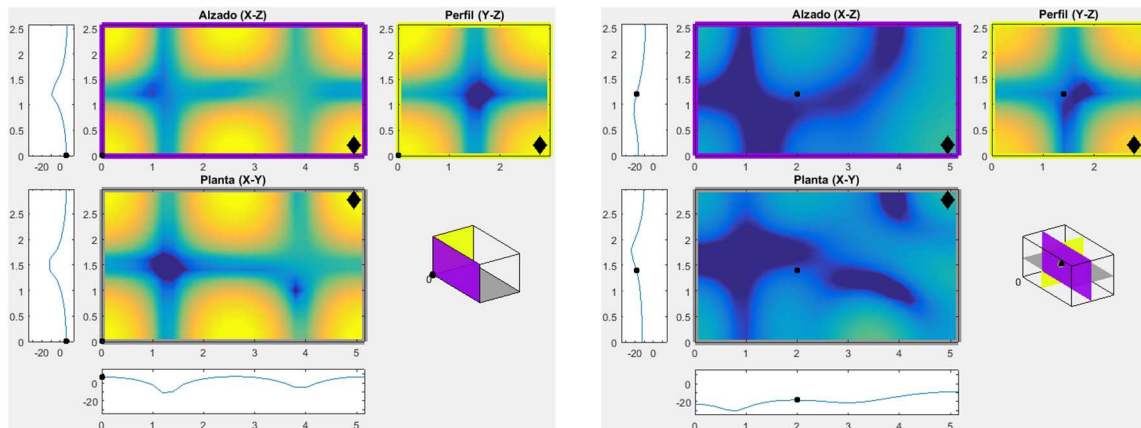


Figura 6. Representación tridimensional del modo propio 211 ( $f = 109,3$  Hz) en dos posiciones.

Una potencialidad destacable de la aplicación es la de mostrar el resultado de la superposición de varios modos propios, algo que puede ocurrir a determinadas frecuencias y que es poco intuitivo de visualizar. En la sala bajo estudio se observa este hecho al representar en la Figura 7 los NPS obtenidos a 66 Hz, donde se superponen los modos 001, 110 y 200, en los dos puntos anteriormente considerados.

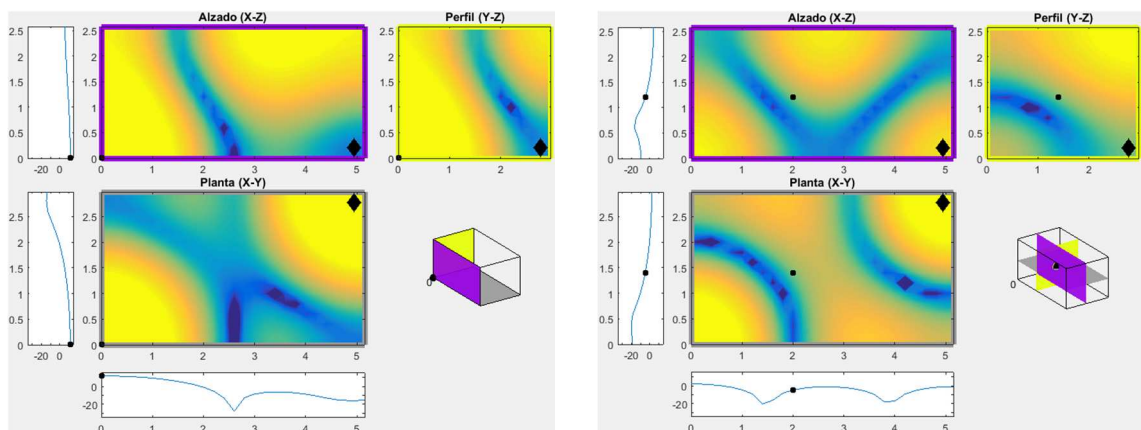


Figura 7. Representación tridimensional de los NPS a 66 Hz, superposición de los modos 001, 110 y 200.

### 3.3 Análisis en receptor individual

A modo de evaluación de los métodos de predicción, tanto el analítico como el basado en medidas experimentales, se comparan las distribuciones modales obtenidas en ambos casos con la correspondiente a una medida real, todas ellas centradas en la misma posición. En la Figura 8 se observa en primer lugar el parecido entre la medida y la predicción según la ecuación (6). No obstante, esta predicción es demasiado sensible a la aparición de nodos en las medidas

de las posiciones sobre las que se calcula, especialmente en la posición de referencia. Así, aparecen picos no esperados coincidiendo con esos nodos.

Sin embargo, la predicción analítica es la más dispar de las tres, aunque se perciben los mismos modos propios, variando su nivel y el ancho de banda. La razón principal de que esto ocurra es que se emplea un tiempo de reverberación promedio a la hora de realizar la predicción analítica.

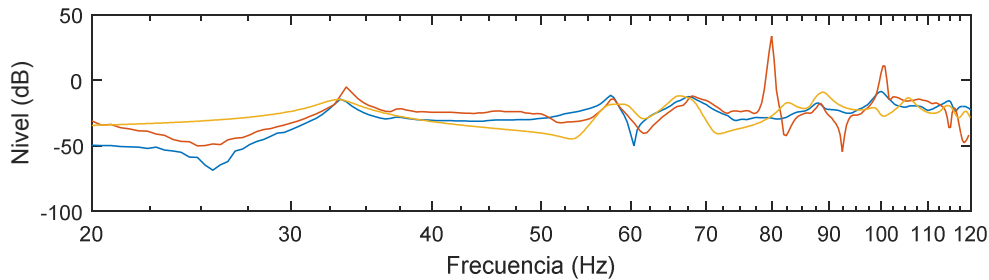


Figura 8. Distribuciones modales obtenidas mediante medidas (azul), predicción según ecuación (6) (roja) y predicción analítica (amarilla).

En vista de los resultados anteriores se identifica la necesidad de robustecer el método de predicción basado en medidas en los ejes. Por un lado, interesa poder eliminar los picos indeseados que aparecen en la distribución modal. Por otro lado, la metodología de esta predicción exige que las salas bajo estudio no estén equipadas, no permitiendo analizar sus respuestas en condiciones de uso habituales. Queda así abierta como línea futura la búsqueda de un nuevo método aplicable a cualquier condición de sala.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una aplicación capaz de predecir respuestas de salas pequeñas rectangulares en un rango frecuencial de 20 a 120 Hz mediante dos métodos, uno analítico y otro experimental. La predicción analítica permite obtener una primera aproximación, válida para la identificación de los modos propios de la misma pero que no tiene en cuenta las características acústicas de la sala, dependientes de la frecuencia. El método experimental es una alternativa que solventa esta carencia basándose en la predicción de niveles a partir de un conjunto de medidas reales.

La predicción a partir de medidas presenta la ventaja de ser poco costosa, puesto que se requiere realizar un número limitado de medidas y, empleando una fórmula empírica simple, obtener las respuestas de la sala en cualquier posición de receptor. No obstante, su propia sencillez la hace poco robusta ante la posible aparición de nodos en las respuestas medidas. Al mismo tiempo, el método resulta demasiado restrictivo en referencia al mobiliario de la sala, ya que no puede haber obstáculos en los tres ejes medidos.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de Investigación I+D+I con referencia BIA2016-76957-C3-2-R

#### REFERENCIAS

- [1] L. Cremer, H.A. Mueller, T.J. Schultz (1982). *Principles and Applications of Room Acoustics*. Applied Science.
- [2] L.E. Kinsler (2009). *Fundamentos de Acústica*. Ed. Limusa.



[3] M. Kleiner, J. Tichy (2014). *Acoustics of Small Rooms*. CRC Press.

[4] H. Kuttruff (2009). *Room Acoustics* (5th ed.). Spon Press.

[5] T. B. Sjølingstad (2005). *Distribution of sound fields in rooms at low frequencies*. Institutt for elektronikk og telekommunikasjon. Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitettrondheim.

[6] N.H. Fletcher, T.D. Rossing (2010). *The physics of musical instruments*, Springer.

[7] M. Berzborn, R. Bomhardt, J. Klein, J.G. Richter, M. Vorländer, *The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing*. DAGA 2017.