

## MEDIDA DE RESPUESTAS IMPULSIVAS PARA LA CARACTERIZACIÓN ESPACIAL DEL CAMPO SONORO EN SALAS

PACS: 43.58.Gn

Joaquín Serrat; Miguel Galindo; Teófilo Zamarreño; Sara Girón.  
Departamento de Física Aplicada II  
Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC)  
Universidad de Sevilla.  
Avda. Reina Mercedes 2  
41012 Sevilla,  
Tel. +34 954556612 Fax: +34 954557892,  
E-Mail: [kim@nomasruido.com](mailto:kim@nomasruido.com); [mgalindo@us.es](mailto:mgalindo@us.es); [teofilo@us.es](mailto:teofilo@us.es); [sgiron@us.es](mailto:sgiron@us.es).

### ABSTRACT

In order to describe in detail the spatial behaviour of the sound field in rooms in relation to the spatial attribute of auditory sensation, in this paper it has been developed a system for measuring three-dimensional impulse responses. Spatial information is collected at different points of the receiver by a B-format Soundfield MKV microphone. This has a matrix composed of four integrated capsules that can be configured to establish different directivity patterns. The process involves the adjustment, configuration, calibration and tuning of the entire measurement chain.

### RESUMEN

Con objeto de describir en detalle el comportamiento espacial del campo sonoro en salas en relación con el atributo de espacialidad de la sensación auditiva, en este trabajo se ha puesto a punto un sistema de medida de respuestas al impulso tridimensionales. La información espacial se recoge en los diferentes puntos de recepción mediante un micrófono B-format Soundfield MKV. Éste consiste en una matriz de cuatro cápsulas integradas que se pueden configurar para establecer diferentes patrones de directividad. El proceso supone el ajuste, configuración, calibración y puesta a punto de toda la cadena de medida.

### INTRODUCCIÓN

Las respuestas al impulso obtenidas en recintos a partir de fuentes y micrófonos omnidireccionales no contienen ninguna información espacial del campo sonoro del mismo. Aunque es común utilizar micrófonos con patrón de directividad en forma de ocho para determinar las fracciones de energía lateral inicial,  $J_{LF}$  y  $J_{LFC}$  según se describe en [1], estos parámetros implican orientar dicho micrófono de forma que el plano de respuesta nula pase por la fuente con el fin de ponderar adecuadamente la energía aportada por las reflexiones laterales. No obstante, disponer de un conocimiento más detallado de la procedencia espacial de la energía



**Figura 1.** Esquema del sistema de medida.

puede permitir valorar su efecto en la sensación de percepción espacial [2-3] o incluso refinar modelos analíticos para describir el campo acústico en función de la tipología del recinto [4].

El objetivo del presente trabajo es obtener esa información espacial de la procedencia de la energía acústica a partir de un micrófono B-format que permite captar respuestas impulsivas en las tres direcciones de un sistema de referencia XYZ centrado en el propio micrófono. Para ello se ha implementado un sistema de medida que incluye, además del micrófono B-format, una "tarjeta" de sonido (en realidad se trata de un dispositivo externo conectado al ordenador vía USB), el software de medida (WinMLS capaz de procesar hasta 8 canales), la etapa de potencia y la fuente dodecaédrica omnidireccional. Tras una calibración y puesta a punto de toda la cadena, se han realizado diferentes ensayos en un recinto de referencia con objeto de verificar la adecuación de las respuestas al impulso registradas. Para ello se comparan los parámetros acústicos de sala obtenidos a partir de la respuesta al impulso omnidireccional del micrófono B-format, con las de otros micrófonos de reconocido prestigio, y que son de uso frecuente por nuestro equipo de investigación.

## EQUIPO DE MEDIDA

En la Figura 1 se muestra un esquema de toda la cadena de medida en la que se identifican los diferentes componentes. El núcleo del sistema lo constituye el micrófono modelo MKV de la firma Soundfield [5], constituido por una matriz de cuatro cápsulas integradas en el dispositivo, y montadas en forma de tetraedro, que, gracias a su controlador (procesador y preamplificador a la vez), permite configurar varios patrones de directividad cuyas respuestas entrega el controlador simultáneamente en las múltiples salidas. Las señales que entrega el módulo controlador se componen de una señal estereofónica, fruto de la directividad resultante de la combinación de los micrófonos (*Stereo Outputs, Left+Right*) y cuatro señales de salida de cada uno de los micrófonos componentes de la matriz, por separado: *B-Format (W-out)* señal del micrófono con directividad omnidireccional, (*X-out*) señal del micrófono con directividad en figura de ocho en el eje X, (*Y-out*) señal del micrófono con directividad en figura de ocho en el eje Y, y (*Z-out*) señal del micrófono con directividad en figura de ocho en el eje Z. En la Figura 2 se presenta el sistema de referencia y los patrones de directividad de las cuatro señales.

Se debe tener en cuenta que en el formato B-Format se ajusta la sensibilidad del micrófono omnidireccional (círculo negro de la Figura 2) 3 dB por debajo que la de los 3 micrófonos en figura de ocho en cada eje. Farina [6] ofrece una detallada descripción del comportamiento de la directividad en función de la frecuencia de este micrófono.

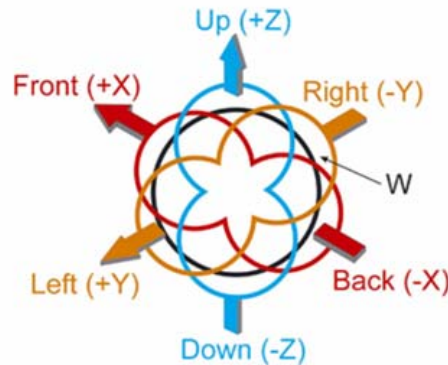


Figura 2. Sistema de referencia y esquema de los patrones de directividad de las cuatro señales.

El pre-amplificador, permite a su vez, seleccionar la sensibilidad del micrófono, adecuar la señal de entrada, así como seleccionar la configuración de las cápsulas con la que se va a operar y, por tanto, qué señales van a estar disponibles en las diferentes salidas.

El dispositivo USB de audio utilizado es el modelo Edirol UA-101 de Roland [7]. Se trata de un dispositivo multicanal *full duplex*, con *interface* Hi-Speed USB para realizar la conversión analógica-digital de cada uno de los canales de entrada ( $W$ ,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) del sistema de captación y transferirla al programa de medidas por canales independientes. Se trabaja con una frecuencia de muestreo de 48 kHz y una codificación de 16 bits. Así mismo, se utilizará un canal de salida del dispositivo de sonido en modo bucle para tener una referencia sin que ningún elemento se intercale en dicho bucle. La sensibilidad de las entradas se ajustará a -10 dB para adecuar la señal de línea procedente del pre-amplificador del micrófono al dispositivo y evitar la saturación.

El software usado es WinMLS 2004 [8], nivel 7, con licencia para 8 canales, que permite realizar las medidas de los parámetros acústicos de sala en su totalidad (previa calibración del sistema). Por último, la etapa de potencia es InterM-1000 y la fuente sonora omnidireccional dodecaédrica es la DO-12 de 01dB-Stell.

## CALIBRACIÓN

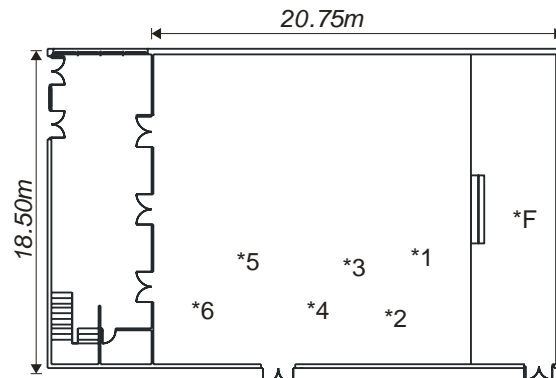
La tarjeta de sonido no es compatible con el *mixer* de Windows, por lo que no se tiene control sobre el nivel de emisión. Para evitar alterar los niveles empleados en las mediciones se escogieron como entradas aquellas que no presentan controles de ajuste de nivel, por no estar éstos graduados.

Se procedió a la calibración de las entradas mediante una señal senoidal generada por la propia tarjeta a 100 Hz, registrando el nivel de la señal en voltios mediante un voltímetro. Posteriormente se calibraron las salidas. Se comprobó la respuesta en frecuencia de la tarjeta de sonido proporcionando una respuesta plana entre los 20 Hz y los 20000 Hz. Las 4 señales registradas no están desfasadas entre ellas en el tiempo, pero el dispositivo de sonido introduce un retraso aleatorio en cada medida de la respuesta al impulso. Con objeto de tener información correcta de la distancia fuente-receptor se optó por utilizar una de las salidas en modo bucle con una de las entradas y utilizar ese canal como referencia. De esta manera se evita el retardo aleatorio introducido por el dispositivo de audio.

Para la obtención del parámetro Fuerza sonora  $G$ , se procedió a calibrar todo el sistema de medida en cámara anecoica atendiendo a las especificaciones de la norma ISO 3382-1 [1]. En la cámara anecoica, se realizaron 29 medidas sobre una circunferencia de 3 m de radio en torno a la fuente emisora. Esto corresponde a un giro de 12.4 grados de la fuente, manteniendo



**Figura 3.** Calibración de la cadena de medida en la cámara anecoica.



**Figura 4.** Planta del salón de actos de la ETS de Arquitectura de Sevilla con la posición de la fuente (F) y de los micrófonos (\*).

fija la posición del micrófono. Además se monitorizaron las condiciones de temperatura y humedad relativa de la cámara. En la Figura 3 se muestra una vista del micrófono y la fuente en el interior de la cámara durante el proceso de calibración. Los resultados son almacenados por WinMLS y utilizados cada vez que se ha de calcular el parámetro G.

## ENSAYOS REALIZADOS

Una vez terminado el proceso de calibración se realizaron ensayos en el salón de actos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla. Se realizaron medidas en 6 puntos con 3 configuraciones distintas con objeto de comparar los resultados obtenidos de las medidas de las respuestas al impulso. En cada configuración se utilizó un micrófono diferente, con su correspondiente preamplificador y fuente de polarización. En concreto se utilizaron: uno omnidireccional (B&K 4190 con un preamplificador 2669 polarizado por la fuente y acondicionador de señal OPUS 01 dB); otro multipatrón omnidireccional-figura de ocho (Audio-Technica AT4050/CM5 y fuente de polarización ARTcessories), y finalmente el B-format (MKV de Soundfield).

Se controlaron las condiciones de temperatura y humedad relativa durante todo el proceso de medida. En la Figura 4, se presenta el plano de la planta de la sala analizada, la posición de la fuente y de los puntos de recepción.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A partir de las respuestas al impulso medidas en cada punto de recepción se calcularon los principales parámetros de calidad acústica de salas: Tiempo de reverberación  $T_{30}$ , Tiempo de caída inicial EDT, Claridad  $C_{80}$ , Definición  $D_{50}$ , Tiempo central  $T_s$ , Fuerza sonora G y Fracción de energía lateral inicial  $J_{LF}$ . Los valores obtenidos de distancia fuente-receptor difieren ocasionalmente en 1 cm.

**Tabla 1.** JND para cada parámetro.

Parámetro	G	$T_{30}$	EDT	$C_{80}$	$D_{50}$	$T_s$	$J_{LF}$
JND	1 dB	5 %	5 %	1 dB	5%	10 ms	0.05

Se han evaluado las diferencias punto a punto entre pares de micrófonos, comparándose estas con el umbral diferencial recomendado: Just Noticeable Difference JND [1, 9] cuyos valores se muestran para los parámetros antes mencionados en la Tabla 1. Los valores correspondientes a  $T_{30}$  y EDT son valores relativos.

Cuando el rango de frecuencias estudiado corresponde a las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4000 Hz las diferencias en todas las posibles combinaciones no superan en ningún caso 1 JND para  $T_{30}$ ,  $T_S$ ,  $C_{80}$  y  $G$ . Para el caso del EDT, éste presenta ocasionalmente valores superiores en 3 de los puntos receptores, no siempre coincidentes, y en alguna banda de

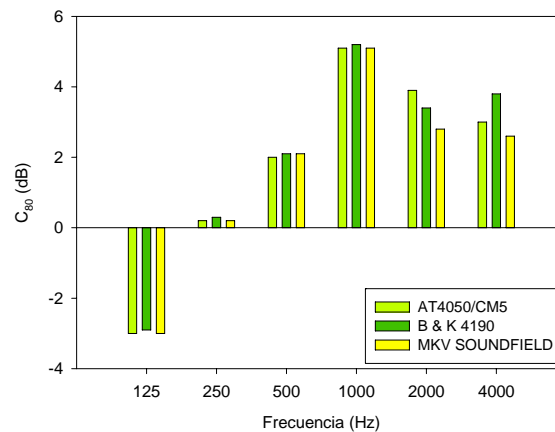


Figura 5.  $C_{80}$ , en el receptor 3, frente a la frecuencia para los tres micrófonos empleados.

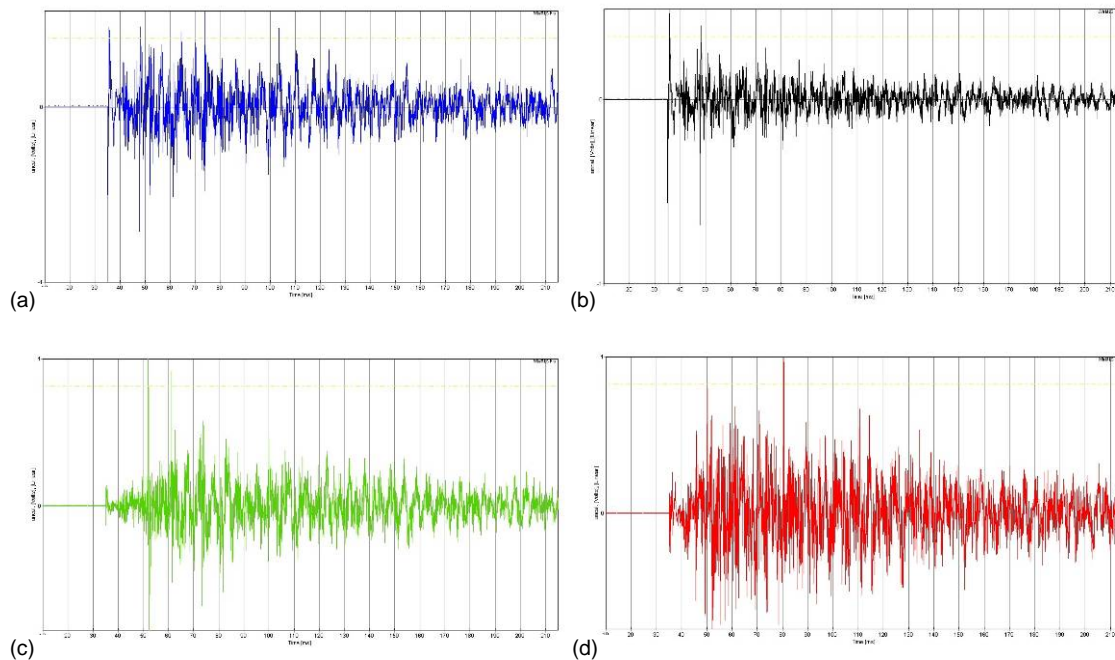
octava particular para las tres comparaciones. Para el parámetro  $D_{50}$  se supera levemente el JND en un punto cuando comparamos el micrófono B&K con los otros dos y en tres puntos cuando comparamos el micrófono de Audio-Technica con el de Soundfield. Igual que antes las diferencias tienen lugar solamente en algunas bandas de octava específicas. En general los valores obtenidos por los tres micrófonos son altamente equiparables. A modo de ejemplo, en la Figura 5 se presentan los valores del parámetro  $C_{80}$  por bandas de octava para los tres micrófonos empleados en el punto de recepción 3 del Salón de Actos.

Cuando se amplía el rango al intervalo de bandas de octava desde 63 a 16000 Hz, el número de diferencias que superan el umbral diferencial recomendado aumenta sensiblemente, aunque estos resultados siguen apareciendo en bandas de octava singulares. La banda de octava de 63 Hz presenta diferencias notables exclusivamente en el caso de  $T_{30}$ . En las bandas de octava de 8000 y 16000 Hz, se ven afectados regularmente todos los parámetros y en todos los puntos de recepción con una mayor influencia en el caso de la banda de 16000 Hz. Estas diferencias resultan lógicas teniendo en cuenta los diámetros de los diferentes micrófonos, que aumentan con respecto al B&K en especial el MKV de Soundfield, cuyo diámetro no cumple las exigencias de la norma [1]. En cualquier caso las diferencias aparecen en todas las combinaciones analizadas.

Por último cabe analizar los resultados del parámetro  $J_{LF}$  obtenidos por el micrófono AT4050/CM5, y por el micrófono MKV, éstos últimos obtenidos a partir de la señal omnidireccional y la de figura de ocho determinada en la dirección del eje Y (ver Figura 2). Se han encontrado diferencias entre los resultados, con valores incorrectos del parámetro que superan el valor máximo posible (la unidad). Esto se debe a que entre ambas señales existe una diferencia de 3 dB inherentes al formato B-format. Este ajuste está todavía siendo estudiado para poder completar la calibración del sistema. De cualquier modo a nivel general se estima que el sistema ha quedado correctamente configurado y listo para su uso.

A modo de comparación en la Figura 6 se presentan la respuesta al impulso con patrón omnidireccional, y las tres respuestas al impulso correspondientes al patrón en figura de ocho en las direcciones de los tres ejes coordenados para el punto de recepción 4. En la parte superior, se pueden observar las respuestas al impulso para el patrón omnidireccional (izquierda) y de figura de ocho, eje X (derecha). En ambas se detecta la llegada del sonido





**Figura 6.** Respuestas al impulso en el receptor 4 con patrón omnidireccional (a) y en figura de ocho para las direcciones X (b), Y (c) y Z (d).

directo. En la parte inferior se muestran las respuestas al impulso con patrón de figura de ocho, eje Y (izquierda) y Z (derecha). En ambas el sonido directo queda eliminado por el efecto de la directividad al llegar dicho sonido en el plano nulo del patrón.

Con esta información se podrá analizar el comportamiento tridimensional de la densidad de energía acústica en el interior de los recintos. Como ejemplo, hemos escogido el cálculo de un parámetro,  $R_{80}$ , que valora el cociente de la energía inicial (80 ms) y la final a partir de las tres respuestas al impulso. En la Tabla 2 se exponen los valores calculados, en dB, para este parámetro en el punto 4 para las cuatro respuestas al impulso en las diferentes bandas de octava.

**Tabla 2.** Valores de  $R_{80}$  (dB) en el punto 4, para las cuatro respuestas al impulso en las diferentes bandas de octava.

	$R_{80} = 10 \log \left( \frac{E_0^{0.08}}{E_{0.08}^{\infty}} \right)$					
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Omni	0.7	-0.1	1.4	4.3	2.5	3.5
X	0.7	-0.6	4.2	7.3	4.2	5.1
Y	2.1	-1.0	0.6	4.1	2.6	2.1
Z	-0.8	-0.8	2.4	2.7	1.9	2.5

Si comparamos los resultados de las dos contribuciones con sonido directo, W y X, vemos que los valores obtenidos para ésta última aumentan en las medias y altas frecuencias. Si aceptamos que las aportaciones en los primeros 80 ms no difieren sensiblemente en ambas configuraciones, este incremento es debido a una disminución de la energía final en la respuesta impulsiva X. Cuando comparamos las contribuciones sin presencia del sonido directo Y y Z, la debida a las respuestas impulsivas del eje Z resultan ser las que menor aportación energética introducen en casi todas las bandas de octava.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Centro Nacional de Medios de Protección de Sevilla, del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, perteneciente al Ministerio de Trabajo e Inmigración por permitirnos el uso de la cámara anecoica y sus instalaciones. Este estudio forma parte del proyecto de investigación I+D+i del Ministerio de Ciencia e Innovación con referencia BIA2010-20523.

## REFERENCIAS

- [1] International Standard ISO 3382-1:2009(E). Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Performance spaces, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (2009). Traducida al español en Febrero de 2010.
- [2] M. Morimoto, K. Iida, K. Sakugami, "The role of reflection from behind the listener in spatial impression". *Applied Acoustics* **62**, 104-124, (2001).
- [3] P. Evjen, J.S. Bradley, S.G. Norcross, "The effect of late reflections from above and behind on listener envelopment". *Applied Acoustics* **62**, 137-153, (2001).
- [4] E. Cirillo, F. Martellota, "Sound propagation and energy relations in churches". *Journal of the Acoustical Society of America* **118**, 232-248, (2005).
- [5] <http://www.soundfield.com/products/mkv.php> (último acceso Julio de 2010).
- [6] <http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/B-format/Test-Soundfield-Microphones/> (último acceso Julio de 2010).
- [7] <http://www.roland.com/products/en/UA-101> (último acceso Julio de 2010).
- [8] <http://www.winmls.com/2004/WinMLS2004Manual.pdf> (último acceso Julio de 2010).
- [9] I. Bork, "Report on the 3<sup>rd</sup> round robin on room acoustical computer simulation - Part II: Calculations". *Acta Acustica united with Acustica* **91**, 753-763, (2005).