

## PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA DIRECTIVIDAD Y LA COBERTURA DE UNA FUENTE SOBRE UN ELEMENTO DE FACHADA DE ACUERDO A LA NORMA ISO 140-5

PACS: 43.15.+s., 43.38.-p., 43.58.-e.

Sánchez Bote, José Luis<sup>1</sup>; Gómez Alfageme, Juan José<sup>2</sup>.  
Departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones.  
Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación.  
Universidad Politécnica de Madrid.  
Ctra. de Valencia, km. 7. 28031 Madrid. España  
Tlf: +34 91 3365481. Fax+34 91 3367784  
<sup>1</sup>jbote@diac.upm.es  
<sup>2</sup>alfageme@diac.upm.es

### ABSTRACT

The Section "4.2 loudspeaker" of the UNE-EN ISO 140-5 International Standard: "Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades", specifies that the directivity of the loudspeaker used in the test must ensure in all frequency bands of interest, local level differences less than 5dB (or 10dB for façade dimensions greater than 5m), measured in free field over an area of the same size and orientation as the wall or element to be tested. This requirement must be verified in the frequency bands of interest which are, at least, the third octave bands from 100Hz to 3150Hz, preferably from 50Hz to 5kHz.

In recent years, in the Laboratory of Sound of the EUIT Telecomunicación (Universidad Politécnica de Madrid), the authors have implemented a method that, from directivity measurements of loudspeakers performed in the anechoic room, the direct sound field on a surface in the same layout as indicated in the ISO standard is calculated. It is also estimated the maximum horizontal dimension  $\Delta x_{\max}$  of a rectangular façade for each aspect ratio which verify the standard criteria of either 5dB or 10dB for the maximum differences of direct levels in the façade. This paper details the procedure above introduced.

### RESUMEN

El apartado «4.2 Altavoz» de la Norma Internacional UNE-EN ISO 140-5 «Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y de fachadas» [1] especifica que la directividad del altavoz usado en el ensayo debe asegurar en todas las bandas de frecuencias de interés, unas diferencias de nivel locales inferiores a 5dB (o a 10dB para fachadas de dimensiones mayores a 5m), medidas en campo libre, sobre una superficie del mismo tamaño y orientación que la pared o elemento a ensayar. Este requisito debe verificarse en unas bandas de frecuencia de interés que sean como mínimo los tercios de octava desde 100Hz hasta 3150Hz, y preferiblemente desde 50Hz hasta 5kHz.

Desde hace unos años, en el Laboratorio de sonido de la EUIT de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, los autores han implementado un método en el que, a partir

de las medidas de directividad en cámara anecoica de la fuente sonora a ensayar, se calcula el campo sonoro directo sobre una superficie ficticia que representa un elemento de fachada en la misma disposición que se indica en la norma ISO 140-5 y con unas dimensiones según se requieran en el procedimiento. También se estima la dimensión horizontal máxima  $\Delta x_{\max}$  de una fachada rectangular de relación de aspecto fija que permite verificar la norma con los criterios de 5dB y 10dB de diferencias máximas de niveles directos en dicha fachada. En esta ponencia se detalla el procedimiento anterior.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde hace unos años, en el Laboratorio de Sonido de la EUIT de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, los autores han implementado un método en el que a partir de las medidas de directividad en cámara anecoica de la fuente sonora a ensayar se calcula el campo sonoro directo sobre una superficie ficticia que representa un elemento de fachada en la misma disposición que se indica en la norma ISO 140-5 y con unas dimensiones según se requieran en el procedimiento. También se estima la dimensión horizontal máxima  $\Delta x_{\max}$  de una fachada rectangular de relación de aspecto fija que permite verificar la norma con los criterios de 5dB y 10dB de diferencias máximas de niveles directos en dicha fachada.

Según la norma ISO, las bandas de frecuencia de interés serán como mínimo los tercios de octava desde 100Hz hasta 3150Hz, y preferiblemente desde 50Hz hasta 5kHz. Con ese propósito se ha diseñado un conjunto de medidas y cálculos sobre la fuente sonora que se describen brevemente a continuación.

Las medidas se realizarán en condiciones de campo libre sobre la fuente sonora, para determinar la directividad de la misma en sus planos horizontal y vertical. Adicionalmente, se medirá también la respuesta en frecuencia de dicha fuente. Los cálculos consisten en la interpolación de la directividad en los planos necesarios no medidos, la caracterización electroacústica de la fuente sonora y el cálculo, en base a lo anterior, del campo sonoro directo sobre una superficie ficticia que represente un elemento de fachada en la misma disposición que se indica en la norma ISO 140-5 y con unas dimensiones dadas. En principio, si no se requiere ningún tamaño específico de fachada, se considerará como tamaño estándar de la misma el siguiente: Dimensión horizontal x dimensión vertical;  $\Delta x \times \Delta y = 4\text{m} \times 3\text{m}$ . Adicionalmente se estimará la dimensión horizontal máxima  $\Delta x_{\max}$  de una fachada rectangular de relación de aspecto variable,  $\Delta x/\Delta y = 1, 4/3, 3/2$  y  $2$ , que permite verificar la norma con los criterios de 5dB y 10dB referidos a las diferencias máximas permitidas por la norma de niveles directos en dicha fachada.

A continuación se describe el procedimiento realizado y los resultados obtenidos sobre una fuente real medida por los autores.

## 2. MEDIDAS DE LA FUENTE

### 2.1. Condiciones del ensayo

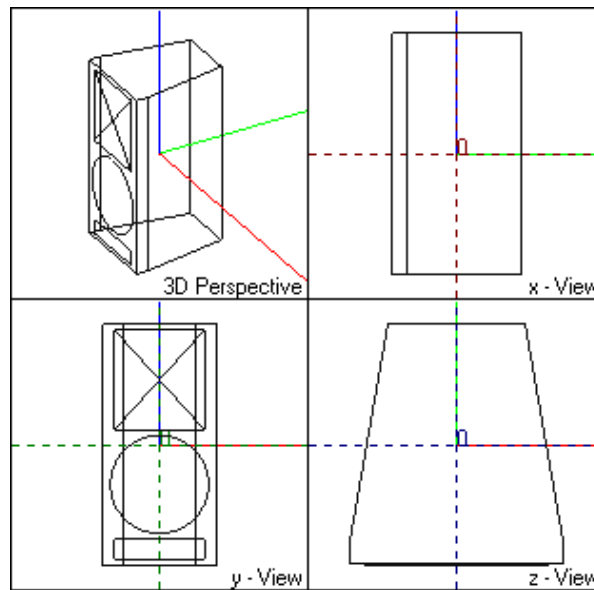
#### Ubicación

El ensayo se realiza en la cámara anecoica de sonido de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación de la UPM. En la Figura 2 se visualizan dos fotografías tomadas durante el ensayo realizado a modo de ejemplo. La fuente se coloca en una diagonal de la cámara anecoica, a 1.5m de las cuñas absorbentes, en una de las esquinas del recinto, y con su centro acústico a una altura  $h = 1.25\text{m}$  sobre el suelo enrejado de dicha cámara anecoica para la medida de la directividad horizontal, y a una altura  $h = 1\text{m}$  para la directividad vertical (Figura 3). El centro acústico de la fuente corresponde al origen de coordenadas que se muestra en la Figura 1. El micrófono se sitúa también en la diagonal de la

sala, a la misma altura que el altavoz,  $h = 1.25\text{m}$  y  $h = 1\text{m}$ , según se mida la directividad horizontal o vertical y a las distancias de la fuente sonora,  $r = 1\text{m}$  y  $r = 1.5\text{m}$  (Figura 3).

**Equipamiento de medida.**

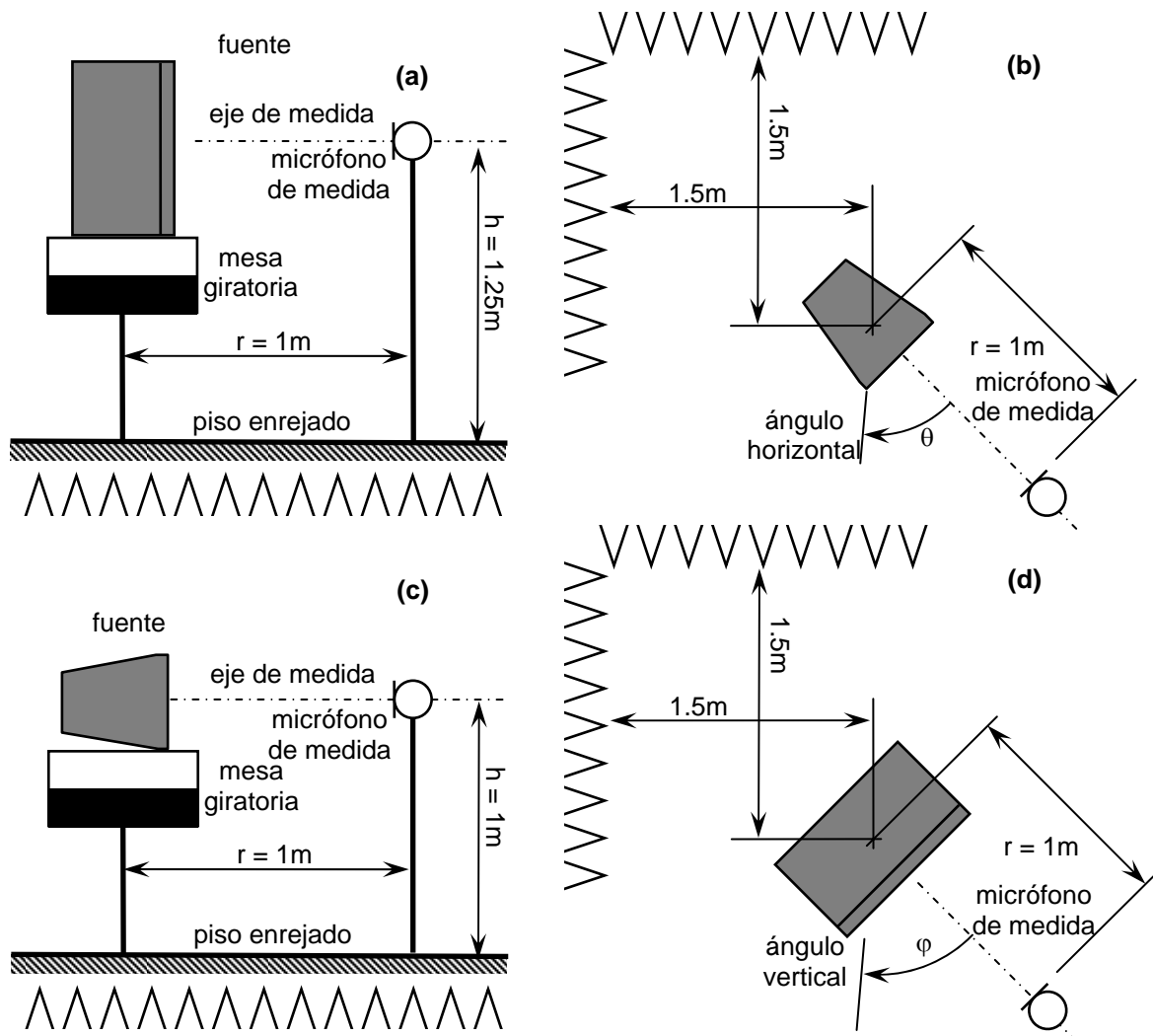
- Analizador y generador de señales: analizador B&K PULSE 3560.
- Micrófono de medida: condensador omnidireccional de 1/2" modelo B&K 4188-L-001.
- Calibrador sonoro: B&K 4231.
- Mesa giratoria: modelo B&K 3922.
- Amplificador de potencia: modelo Inter M – M700.



**Figura 1.** Modelo del altavoz diseñado con el programa EASE 4.3. Se considera que el centro acústico es el origen de coordenadas representado en la figura



**Figura 2.** Fotografías: elementos del ensayo. Se visualiza la fuente en posición para la medida de los planos horizontal y vertical



**Figura 3.** Posiciones de la fuente y el micrófono. **(a)** Vista en alzado para la directividad horizontal. **(b)** Vista en planta para la directividad horizontal. **(c)** Vista en alzado para la directividad vertical. **(d)** Vista en planta para la directividad vertical

## 2.2. Medidas de respuesta en frecuencia y directividad horizontal y vertical, en bandas de 1/3 de octava, desde 100Hz hasta 5kHz

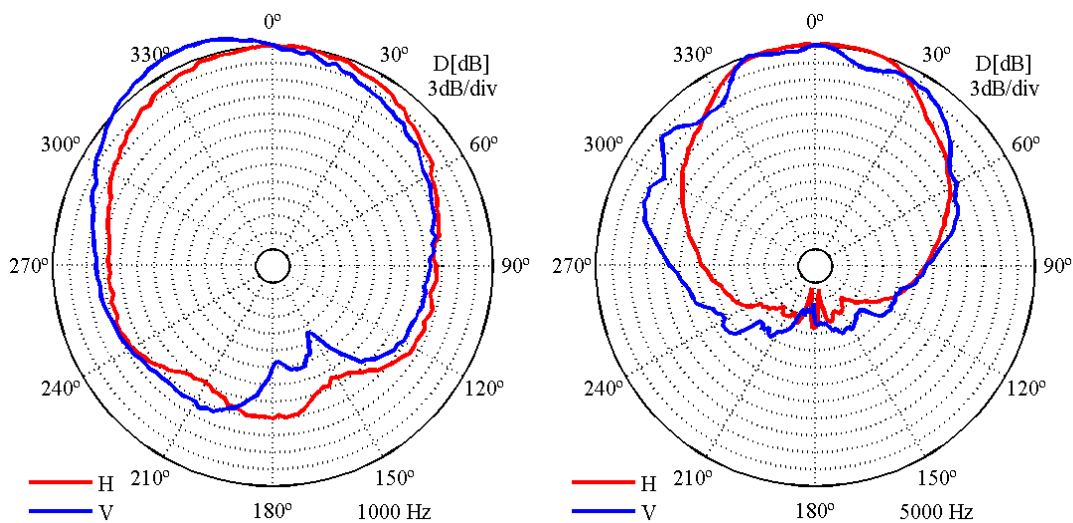
Mediante un amplificador de potencia, se excita la fuente sonora con una señal de ruido rosa y se mide con el analizador de señal. Se obtiene el espectro captado por el micrófono en bandas de tercio de octava y en diferentes posiciones de giro del altavoz sobre los planos horizontal y vertical, con una precisión de  $2.5^\circ$ , de tal manera que se cubran los  $360^\circ$  de ambos planos, horizontal y vertical. En los mismos puntos anteriores se obtiene el espectro plano de ruido rosa a la entrada de la fuente (señal eléctrica). A partir de las dos medidas anteriores se calcula para cada punto el Nivel de Presión Sonora por cada 2.83V de excitación (tensión eléctrica convencional para altavoces),  $SPL[dB]$  (1m, 2.83V), a una distancia de 1m. Con los espectros obtenidos se confeccionan las gráficas de directividad horizontal  $D_H(\theta)[dB]$  y vertical  $D_V(\varphi)[dB]$  y los mapas de Nivel de Presión Sonora por cada 2.83V de excitación,  $SPL_H[dB]$  (1m, 2.83V) y  $SPL_V[dB]$  (1m, 2.83V), para los diferentes ángulos  $\theta$  y  $\varphi$ , respecto del eje de la fuente sonora y para los planos horizontal y vertical respectivamente.

### 2.3. Resultados obtenidos de las medidas

A partir de las medidas especificadas en el apartado anterior se obtienen una serie de resultados que se especifican seguidamente.

#### **Curvas polares de directividad horizontal y vertical, $D_H(\theta)$ [dB] y $D_V(\varphi)$ [dB], para las bandas de tercio de octava desde 100Hz hasta 5kHz.**

A partir de las medidas de respuesta en frecuencia en bandas de 1/3 de octava descritas en 2.2 se han obtenido, tras normalizar las mismas, las curvas polares de directividad horizontal y vertical. En la Figura 4 se representan a modo de ejemplo, dos curvas polares de directividad horizontal  $D_H(\theta)$ [dB] y vertical  $D_V(\varphi)$ [dB], para las bandas de tercio de octava de 1kHz y 5kHz. Estas curvas representan el nivel relativo emitido por el altavoz en función de los ángulos de giro  $\theta$  ó  $\varphi$ .

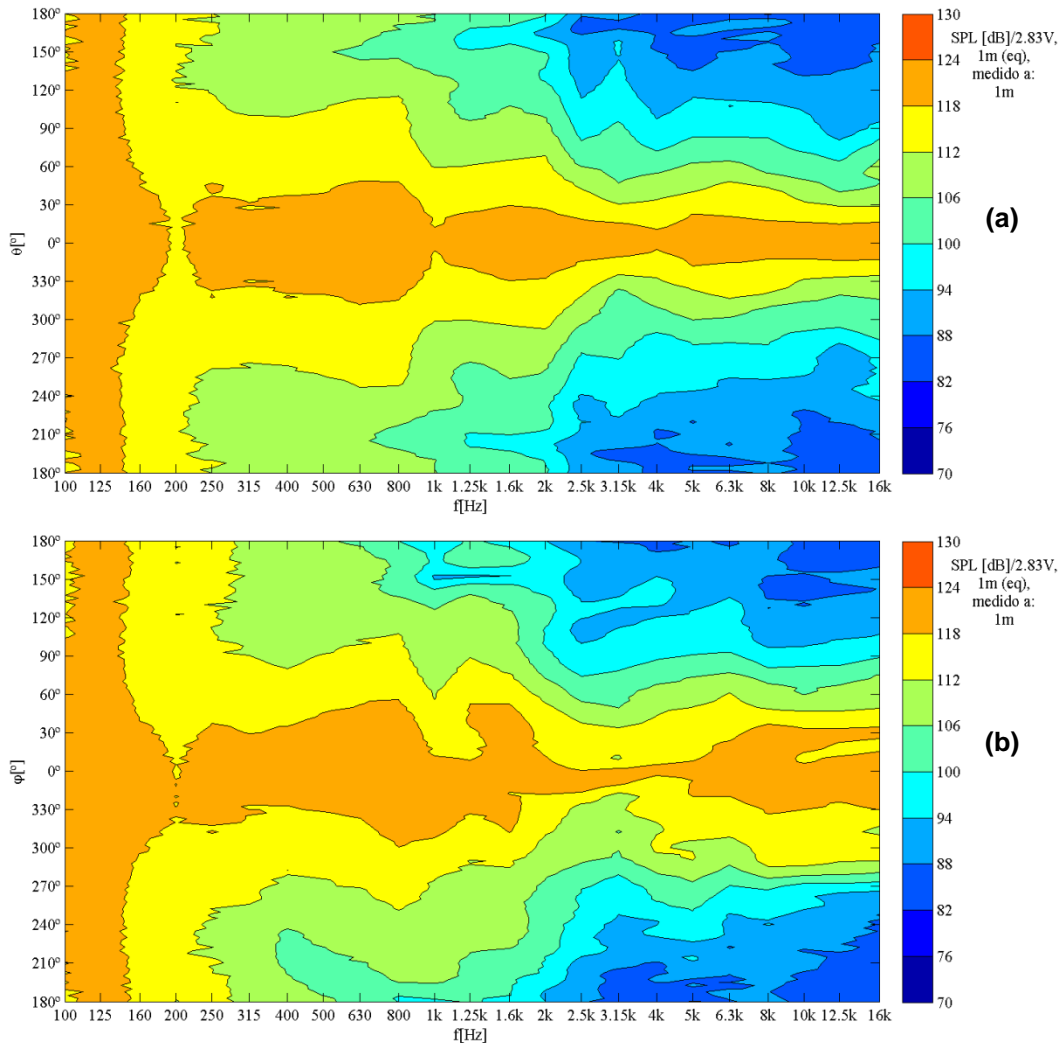


**Figura 4.** Curvas polares de directividad horizontal  $D(\theta)$ [dB] y vertical  $D(\varphi)$ [dB] en decibelios relativos, y medidas en cámara anecoica a 1m del micrófono. Se muestran a modo de ejemplo las bandas de 1/3 de octava de 1kHz y de 5kHz

#### **Mapas de Nivel de Presión Sonora, SPL[dB] (1m, 2.83V) emitido por la fuente sonora, en función de los ángulos horizontal $\theta$ , o vertical $\varphi$ , y la frecuencia, $f$ (bandas 1/3 de octava).**

A partir de las medidas de respuesta en frecuencia en bandas de 1/3 de octava descritas en el apartado 2.2, se ha obtenido el Nivel de Presión Sonora por cada 2.83V de excitación, SPL[dB] (1m, 2.83V) emitido por la fuente sonora para cada ángulo horizontal  $\theta$  o vertical  $\varphi$ , y para cada banda de frecuencia de 1/3 de octava desde 100Hz hasta 16kHz. Con las medidas sobre el altavoz bajo estudio se han obtenido las representaciones de la Figura 5 ( $SPL_H$ [dB] y  $SPL_V$ [dB]) medidas desde la distancia de  $r = 1m$ . En cada mapa se puede visualizar dicho nivel SPL expresado como código de colores.





**Figura 5.** Mapa de Nivel de Presión Sonora por cada 2.83V de excitación, SPL[dB] (1m, 2.83V) medido en cámara anecoica en bandas de 1/3 de octava. Fuente a 1m del micrófono. **(a)** Mapa  $SPL_H$ [dB] (1m, 2.83V) en función del ángulo horizontal  $\theta$ . **(b)** Mapa  $SPL_V$ [dB] (1m, 2.83V) en función del ángulo vertical  $\varphi$

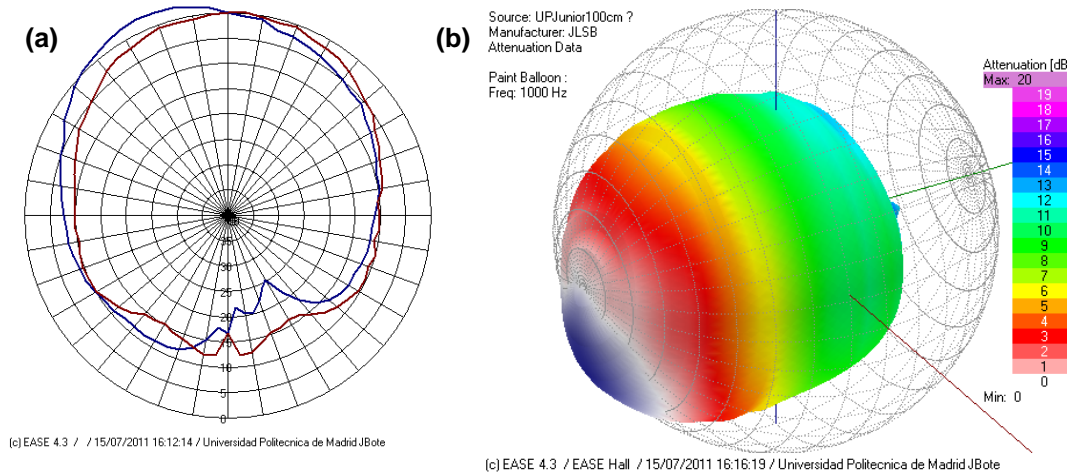
### 3. CÁLCULOS Y SIMULACIONES SOBRE LA FUENTE SONORA MEDIDA

#### 3.1. Condiciones de la simulación

Las medidas anteriores realizadas sobre la fuente, y que caracterizan electroacústicamente a la misma, tanto en directividad como en respuesta en frecuencia, se han introducido en el programa EASE 4.3 de simulación electroacústica para generar una fuente sonora virtual que represente a la fuente bajo estudio (concretamente con el complemento EaseSpkr) [2]-[3]-[4]. También se ha generado un modelo tridimensional que simula la carcasa de la fuente (Figura 1).

En EASE, la precisión requerida para introducir los datos de directividad es de  $5^\circ$ . Puesto que las medidas de directividad se han hecho con una precisión de  $2.5^\circ$ , se ha realizado un submuestreo de las mismas para alcanzar la resolución deseada. Como sólo se han medido los planos de directividad horizontal y vertical, y son necesarios los demás planos comprendidos entre éstos, para calcular dichos planos intermedios del altavoz, se ha realizado una interpolación mediante la aproximación de «lóbulos elípticos» y partiendo de los planos

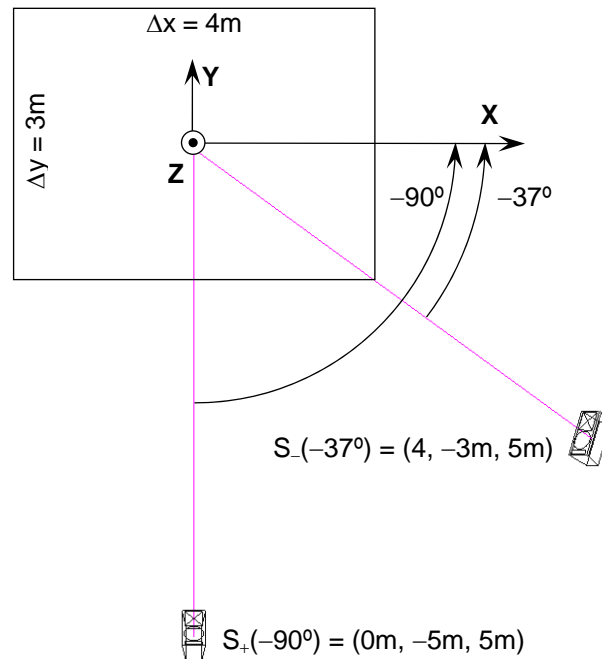
horizontal y vertical sí medidos. En la Figura 6 se visualizan algunas representaciones ofrecidas por el programa EASE 4.3, correspondientes al altavoz simulado.



**Figura 6.** Ejemplo de los datos de directividad (1kHz) introducidos en EASE 4.3. **(a)** Directividad horizontal y vertical. **(b)** Globo de directividad

### 3.2. Resultados obtenidos con EASE 4.3. Mapas e histogramas de distribución de nivel de presión sonora directo SPL, sobre un elemento de fachada tipo de 4m x 3m, acorde a la norma UNE-EN ISO 140-5.

Se ha colocado la fuente simulada en un escenario similar al descrito por la Norma UNE-EN ISO 140-5 acerca de la medida de aislamiento acústico en fachadas (Figura 7).

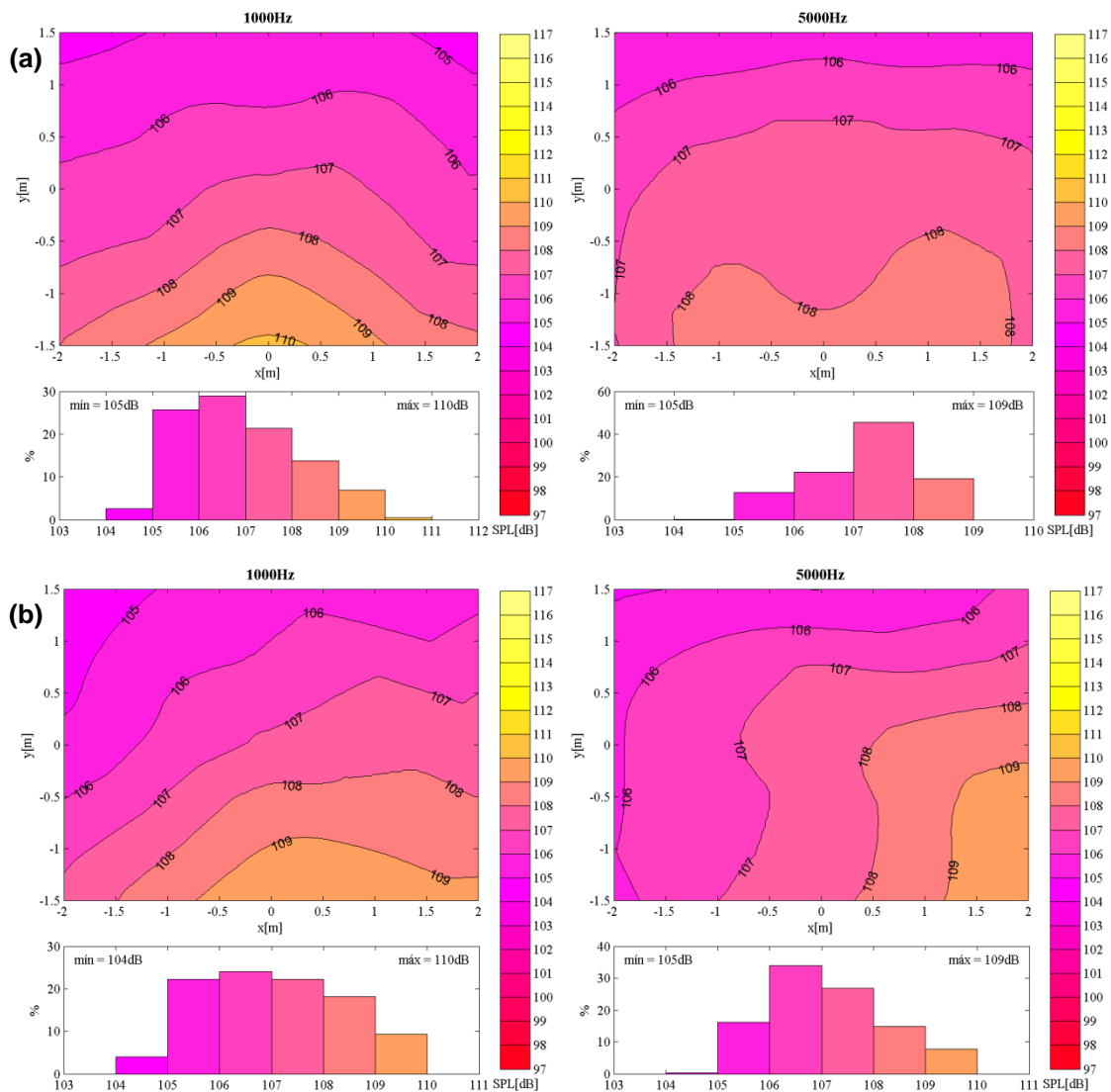


**Figura 7.** Vista en planta según el sistema coordinado del programa EASE 4.3 de los puntos de posicionamiento de la fuente sonora. Posición «más favorable»  $S_+(-90^\circ) = (0, -5, 5)$  y «menos favorable»  $S_-(-37^\circ) = (4, -3, 5)$

Como fachada tipo se ha generado una superficie de cálculo de dimensiones 4m x 3m, y se ha situado el altavoz de tal manera que apunte al centro de la fachada con un ángulo de  $45^\circ$  y en

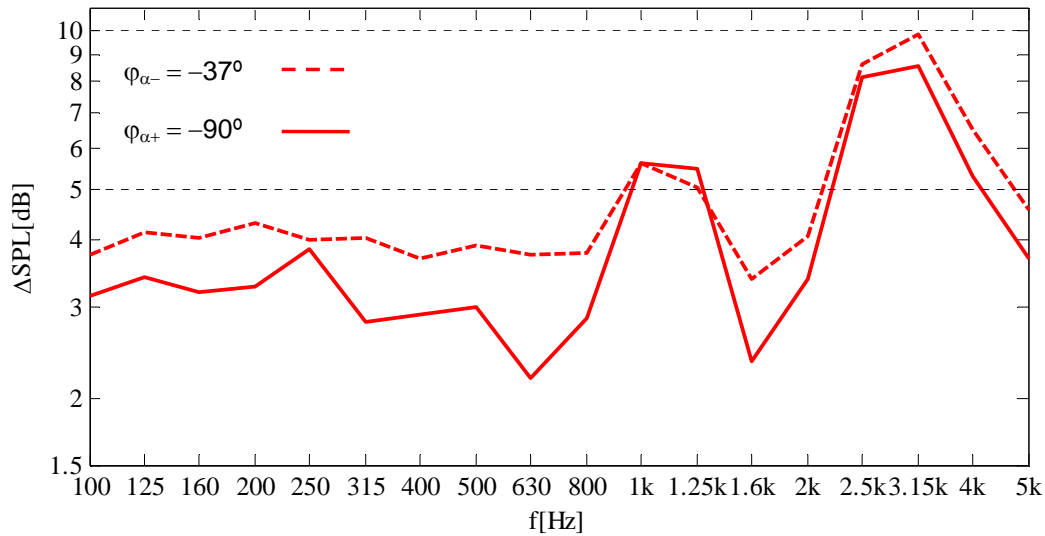
dos posiciones diferentes, acordes con la geometría mencionada en dicha norma. Los dos puntos elegidos para el posicionamiento de la fuente se muestran en la Figura 7.

Estas dos posiciones del altavoz corresponden respectivamente a la «más favorable»,  $S_+(-90^\circ)$ , y la «menos favorable»,  $S_-(-37^\circ)$ . La posición a priori más favorable corresponde a aquella en que el altavoz se sitúa justo debajo del centro de la fachada, a  $-90^\circ$  de azimut en coordenadas esféricas, y la menos favorable a la que el altavoz se sitúa sobre la diagonal de la fachada, a un azimut esférico de  $-37^\circ$ . En los dos los casos el altavoz se dispone horizontalmente (como apoyado en el suelo), simulando su posición en una prueba real.

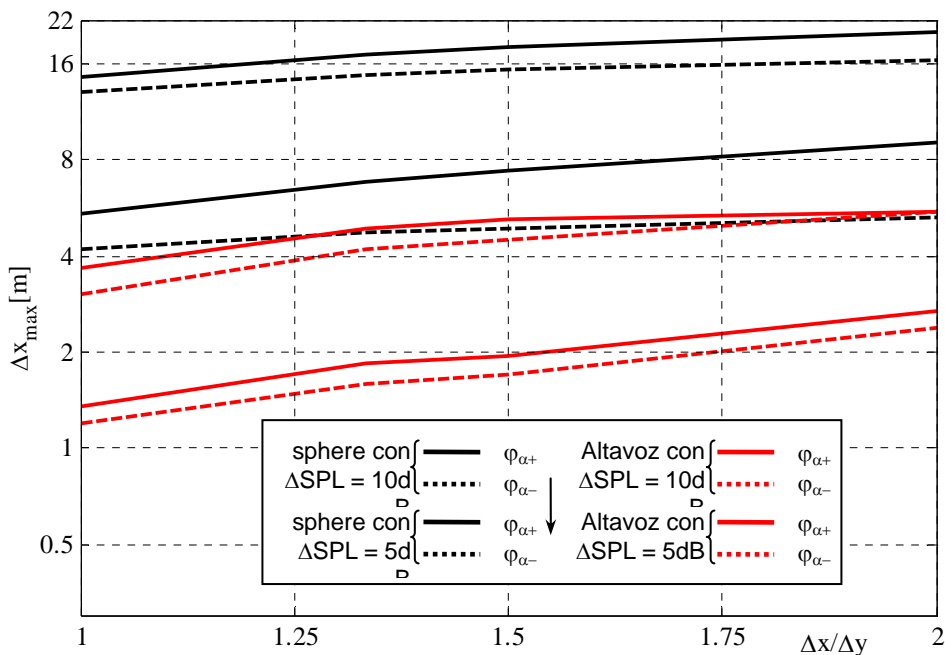


**Figura 8.** Mapas e histogramas de distribución para SPL directo en el elemento de fachada. Se muestran a modo de ejemplo las bandas de 1/3 de octava de 1kHz y 5kHz. **(a)** Altavoz desde el punto  $S_+(-90^\circ)$ . **(b)** Altavoz desde el punto  $S_-(-37^\circ)$





**Figura 9.** Máxima diferencia de nivel en la fachada de prueba de 4m x 3m para el altavoz en las posiciones S+(-90°) y S-(-37°) según se indica, y en las bandas de tercio de octava desde 100Hz hasta 5kHz. Se marcan las dos cotas de máxima diferencia de nivel directo según la norma ISO,  $\Delta\text{SPL} = 5\text{dB}$  y  $\Delta\text{SPL} = 10\text{dB}$



**Figura 10.** Máxima dimensión horizontal de la fachada  $\Delta x_{\text{max}}$  que verifica la norma ISO 140-5 bien con el criterio de  $\Delta\text{SPL} = 5\text{dB}$  (par inferior de curvas de cada color), bien con el de  $\Delta\text{SPL} = 10\text{dB}$  (par superior de curvas de cada color) hasta la banda de tercio de octava de 5kHz y obtenida en función de la relación de aspecto  $\Delta x/\Delta y$ . En cada gráfica se incluyen en color los resultados del altavoz verificado comparados, en negro, con los obtenidos para un altavoz omnidireccional «sphere». En cada caso la línea sólida corresponde a la posición más favorable del altavoz  $\varphi_{\alpha+}$  y la línea punteada a la posición menos favorable  $\varphi_{\alpha-}$ . El altavoz está situado horizontalmente a una distancia de la fachada de  $z_{\alpha} = 5\text{m}$ , apunta al centro de la misma

Mediante el programa EASE 4.3 se ha calculado el nivel de presión sonora directo en el elemento de fachada tipo de dimensiones horizontal x vertical  $\Delta x \times \Delta y = 4\text{m} \times 3\text{m}$  sobre el que

emite la fuente sonora modelada, que se considera alimentada por un espectro plano de señal a una potencia eléctrica constante por tercio de octava, y situada, según el caso, en los puntos  $S_+(-90^\circ)$  y  $S_-(-37^\circ)$  definidos en la Figura 7, siempre apuntando al centro de la fachada, de tal manera que su eje forma un ángulo de  $45^\circ$  con el elemento de fachada. Se han calculado los niveles SPL directos en el elemento de fachada con una precisión de 4cm, correspondientes a  $\lambda/8$  para 1kHz, obteniéndose en cada prueba 7676 puntos de cálculo por banda de frecuencia para toda la superficie.

Para mayor claridad se han obtenido los mapas de cobertura de tipo «isolíneas», correspondientes a los cálculos anteriores. También la distribución estadística de niveles en la superficie por banda de frecuencia considerada. Los cálculos realizados tienen en cuenta la absorción sonora en el aire debido a las condiciones físicas del mismo, fijándose éstas en una humedad relativa del 60%, una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  y una presión atmosférica estática de 1013hPa. Utilizando estas condiciones de cálculo se ha obtenido la Figura 8 que muestra, a modo de ejemplo, algunos de los resultados obtenidos.

Asimismo, en la Figura 9 se representa la máxima variación de nivel en la superficie de cálculo para las posiciones  $S_+(-90^\circ)$  y  $S_-(-37^\circ)$ , medida en las bandas de tercio de octava comprendidas entre 100Hz y 5kHz.

### 3.3. Dimensiones máximas de una fachada rectangular que permiten verificar la norma UNE-EN ISO 140-5 con el altavoz bajo estudio

Utilizando la caracterización electroacústica en EASE del altavoz bajo estudio, se han realizado simulaciones de campo directo en bandas de tercio de octava en el rango de 100Hz – 5kHz sobre una fachada cuadrada de 22m x 22m y con una precisión dada por una malla de 5cm de precisión, tanto en horizontal como en vertical. Se han considerado cinco posiciones, una correspondiente a la más favorable  $\varphi_{\alpha+} = -90^\circ$ , y cuatro a las menos favorables:  $\varphi_{\alpha-} = -45^\circ$ ,  $-36.9^\circ$ ,  $-33.7^\circ$  y  $-26.6^\circ$ , según sea la relación de aspecto considerada para la fachada,  $\Delta x/\Delta y = 1, 4/3, 3/2$  y  $2$ . El altavoz está situado horizontalmente a una distancia de la fachada de  $z_\alpha = 5\text{m}$ , y apunta al centro de la misma. Usando los niveles iniciales, se ha calculado para las cuatro relaciones de aspecto consideradas,  $\Delta x/\Delta y = 1, 4/3, 3/2$  y  $2$  cuál es la dimensión horizontal máxima  $\Delta x_{\text{max}}$  que verifica la norma ISO 140-5 bien con el criterio de  $\Delta\text{SPL} = 5\text{dB}$ , bien con el de  $\Delta\text{SPL} = 10\text{dB}$ , para la banda de tercio de octava más desfavorable. En la Figura 10 se representan los resultados globales obtenidos y se comparan con un altavoz omnidireccional simulado con el propio EASE 4.3 (modelo «sphere»), que marca el modelo de directividad que consigue mayores dimensiones de la fachada y por tanto menores diferencias de niveles acústicos directos en la misma.

## 4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha propuesto un método para la verificación de la directividad de una fuente sonora de acuerdo a los requerimientos de la norma ISO 140-5. El método descrito se lleva ensayando con éxito desde hace algún tiempo por los autores y se ha mostrado más robusto que otros basados en medidas de campo en exteriores. Éste se muestra capaz de predecir los niveles acústicos directos en una superficie ficticia de cualquier tamaño, y para corroborarlo se ha verificado una fuente sonora cualquiera radiando sobre una superficie de dimensiones  $\Delta x \times \Delta y = 4\text{m} \times 3\text{m}$ , obteniéndose las máximas diferencias de nivel de presión sonora directo sobre la superficie bajo estudio, para varias posiciones de la fuente sonora y dictaminándose si el altavoz cumple con la normativa. Adicionalmente se propone un método que permite calcular las dimensiones máximas de la muestra que verifican los requerimientos de la normativa sobre la fuente, en función de la relación de aspecto  $\Delta x/\Delta y$  de una fachada rectangular.

## REFERENCIAS

- [1] ISO 140-5:1998 "Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades"
- [2] EASE, Enhanced Acoustic Simulator for Engineers, information available in <http://ease.afmg.eu/>
- [3] S. Feistel, W. Ahnert, "Modeling of loudspeaker systems using high-resolution data", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 55, pp. 571–597, 2007, July/August
- [4] S. Feistel, W. Ahnert, C. Hughes, B. Olson, "Simulating the directivity behavior of loudspeakers with crossover filters", Paper 7254, 123rd Convention, Audio Engineering Society, October 5–8, 2007, New York, USA