

LA VERIFICACIÓN DE LAS FUENTES SONORAS EN LA ACREDITACIÓN DE LABORATORIOS DE ENSAYOS ACÚSTICOS

PACS: 43.58.-e

Pedrero González, Antonio¹; Sánchez Bote², José Luis; Díaz Sanchidrián¹, César; Navacerrada Saturio, María de los Ángeles¹.

¹Grupo de investigación en acústica arquitectónica

²Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Universidad Politécnica de Madrid

Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid

Tel: +34 913 364 249

Fax: +34 913 366 554

E-mail: arquilav.arquitectura@upm.es

ABSTRACT

UNE-EN ISO / IEC 17025 establishes the general requirements for the competence of testing and calibration laboratories, and serves as a reference for the accreditation bodies. One of the requirements stated in this standard is to ensure that the equipment used in the measurements meet the specifications that determine the corresponding measurement methods.

In this paper the requirements to sound sources in the usual acoustic tests are analyzed. Verification techniques commonly used are described and the most common errors in the verification and evaluation of results are discussed.

RESUMEN

La norma UNE-EN ISO/IEC 17025 establece los requisitos generales para la competencia en la realización de ensayos y sirve de referencia para la acreditación de los laboratorios. Entre los requisitos que establece está el de asegurar que los equipos utilizados en las mediciones cumplen con las especificaciones que determinan las normas de ensayo correspondientes.

En este trabajo se analizan los requisitos que se imponen a las fuentes sonoras en los ensayos acústicos más usuales. Se describen las técnicas de verificación habitualmente utilizadas y se discuten los errores más comunes en las verificaciones y en la evaluación de los resultados.

INTRODUCCIÓN

La acreditación de los laboratorios de ensayo se rige por los criterios enunciados en la norma internacional ISO/IEC 17025 [1], la cual especifica los requisitos que deben cumplirse, tanto de orden técnico como de gestión, para garantizar la competencia técnica de dichos laboratorios.

Con respecto a los equipos de ensayo, la norma establece que, antes de ponerse en servicio, se debe constatar que estos cumplen con las especificaciones requeridas en las normas de ensayo correspondientes. La evaluación del cumplimiento de los requisitos normativos de los

equipos puede realizarse mediante la calibración de los mismos, cuando la especificación es una magnitud susceptible de ser calibrada, o mediante una verificación, en el resto de los casos.

Calibración y verificación son procesos distintos que a menudo se confunden. La *calibración* es un conjunto de operaciones por medio de las cuales se establece una relación entre los valores de una magnitud indicados por un equipo de medida y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones. En general, la calibración compara la lectura de un aparato de medida con la obtenida con otro equipo, de mayor precisión y con trazabilidad metrológica documentada, para el mismo valor de la magnitud a medir.

Según el Vocabulario Internacional de Metrología [2], se define *verificación* como la “aportación de evidencia objetiva de que un elemento satisface los requisitos especificados”. Aunque en la mayoría de los casos la verificación se basa en algún tipo de medición, en ocasiones esta se puede efectuar a partir de revisiones, inspecciones, comprobaciones, o cualquier otra acción que establezca y documente que los equipos cumplen con los requisitos especificados.

Cuando las características de los equipos puedan variar con el tiempo y/o con el uso, es necesario establecer un plan de calibraciones/verificaciones periódicas con una frecuencia que garantice que, en condiciones normales, dichas características se mantienen dentro de las especificaciones entre calibraciones o verificaciones sucesivas.

Dado que toda medición lleva asociada una incertidumbre, las declaraciones de conformidad realizadas a partir de resultados de medida, es decir, las efectuadas a partir de calibraciones o a partir de verificaciones basadas en mediciones, deberían tener en cuenta la incertidumbre correspondiente. Si denominamos *zona de especificación* al margen de tolerancia permitido para una determinada especificación, para poder asegurar el cumplimiento de dicha especificación, el resultado numérico de la medición debe estar contenido en el intervalo denominado *zona de cumplimiento*. La zona de cumplimiento es la zona de especificación reducida en una cantidad igual a la incertidumbre expandida de medida en cada uno de los límites que definen la tolerancia. Esto se ilustra en la Figura 1.

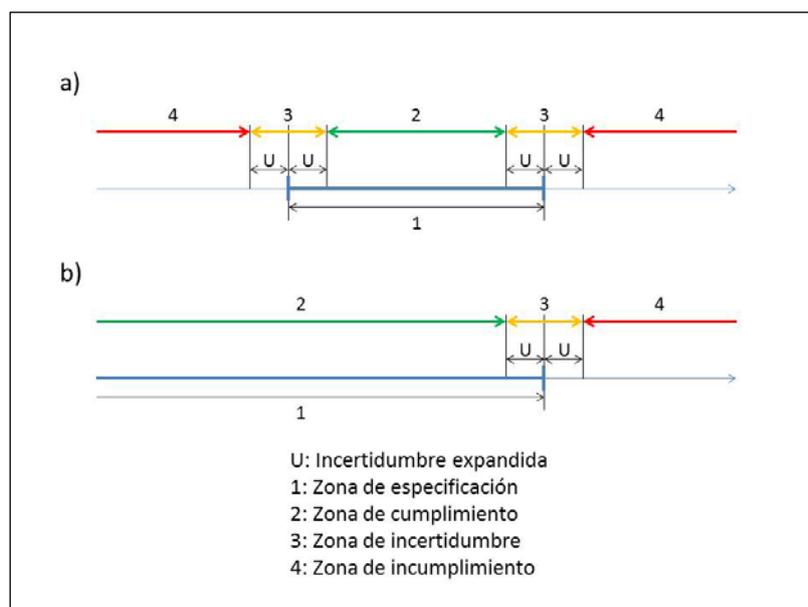


Figura 1. Directrices para la declaración de cumplimiento de especificaciones considerando la incertidumbre de medida/calibración: a) especificación con dos límites; b) especificación con un solo límite.

En numerosos ensayos acústicos es necesario emitir señales de prueba para excitar acústicamente el campo sonoro en el que se efectúa el ensayo. Las magnitudes a determinar en los ensayos se obtienen de la medición de la respuesta de dichos campos sonoros al estímulo acústico aplicado. La emisión de las señales de prueba se realiza mediante lo que denominamos fuentes sonoras.

Los requerimientos que se establecen a las fuentes sonoras utilizadas en los ensayos acústicos son diferentes según el tipo de ensayo que se vaya a realizar. En la mayoría de los casos las magnitudes en las que se expresan las especificaciones no son susceptibles de calibración, por lo que la comprobación del cumplimiento de dichas especificaciones debe realizarse a partir de una verificación.

En este trabajo se analizan dos de las verificaciones más habituales que se requieren a las fuentes sonoras que se utilizan en los ensayos acústicos: la verificación de la omnidireccionalidad, requerida en ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales y en ensayos de tiempo de reverberación, y la verificación de la cobertura sonora, requerida en medidas de aislamiento acústico de fachadas y elementos de fachadas.

VERIFICACIÓN DE LA OMNIDIRECCIONALIDAD

En diversos tipos de ensayos acústicos se requiere una emisión sonora lo más omnidireccional posible. Tal es el caso de los ensayos de tiempo de reverberación según las normas UNE-EN ISO 3382, partes 1, 2 y 3; de los ensayos de aislamiento acústico de locales, tanto en laboratorio, según UNE-EN ISO 10140, como *in situ*, según EN ISO 10052, UNE EN ISO 140-4, recientemente derogada, o UNE-EN ISO 16283-1, que sustituye a la anterior; o de los ensayos de absorción sonora en cámara reverberante según UNE-EN ISO 354. En algunos casos las normas no establecen unos criterios cuantitativos que deban cumplirse sino que se limitan a decir que la fuente sonora debe ser tan omnidireccional como sea posible. En el resto de casos el procedimiento de verificación es similar; la única variación entre unas normas y otras es la amplitud de la zona de especificación.

La explicación del proceso para la verificación es confusa en algunas normas (sobre todo en las más antiguas) lo que ha propiciado, en ocasiones, interpretaciones incorrectas. El procedimiento se explica a continuación.

La verificación debe realizarse en campo libre. En acústica entendemos por campo libre una región del espacio en la cual las ondas sonoras se propagan sin ninguna perturbación, lo que implica que no debe haber ninguna superficie reflectante (incluido el suelo) en las cercanías de los elementos de ensayo. La verificación, por tanto, se debería realizar en cámara anecoica o en exteriores, a una distancia del suelo suficientemente grande como para que la reflexión que este produce tenga, en la posición de medida, una energía despreciable comparada con la que se propaga por el camino directo desde el emisor.

La fuente sonora se debe hacer rotar, mediante una mesa giratoria, con una velocidad de giro constante y suficientemente baja como para garantizar un tiempo de integración adecuado en todas las bandas de frecuencia. El micrófono se sitúa en el plano perpendicular al eje de giro, a la altura del centro de la fuente sonora, y a una distancia que evite el campo próximo de la misma (la normativa propone 1,5 m). Se emite un ruido de banda ancha que cubra el margen de frecuencias de interés. El nivel emitido debe ser tal que la contribución del ruido de fondo en las mediciones sea despreciable.

Se debe medir, para cada banda de frecuencia, el promedio energético del nivel de presión sonora obtenido en un giro completo, L_{360} , y el promedio energético del nivel de presión sonora en todos y cada uno de los "ángulos deslizantes" de 30° producidos en dicho giro, $L_{30,i}$. Se entiende por "ángulo deslizante" una rotación de 30° de la fuente sonora. Cada ángulo

deslizante está desplazado un intervalo de ángulo $\Delta\theta$ con respecto al anterior, donde este $\Delta\theta$ se suele elegir entre 1° y 5° (ver Figura 2). Si se elige un intervalo de ángulo de 1° , el número de ángulos deslizantes a considerar es 360, mientras que si se elige un intervalo de ángulo de 5° este número se reduce a 72.

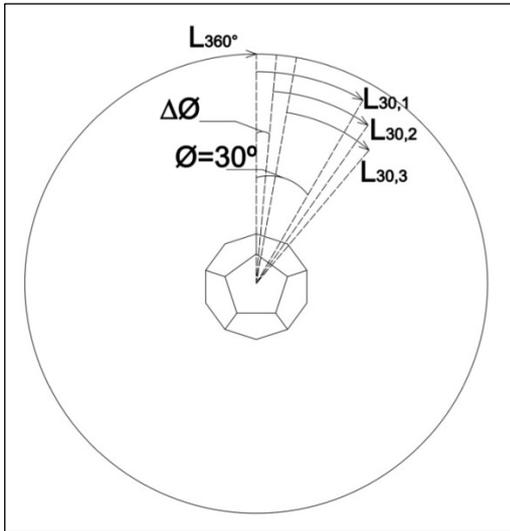


Figura 2. Ángulos deslizantes para la verificación de la omnidireccionalidad de las fuentes sonoras.

El requerimiento se expresa en términos del Índice de Directividad, DI , para cada ángulo deslizante, definido como

$$DI_i = L_{360^\circ} - L_{30,i} \quad (1)$$

Las tolerancias permitidas dependen de la norma de ensayo. En el caso de las normas de medida del aislamiento acústico las tolerancias se definen en bandas de tercio de octava y sus valores son los mismos, tanto para las normas de ensayo *in situ* como para las normas de medida en laboratorio. Las tolerancias de las normas de medida del tiempo de reverberación se definen en bandas de 1/1 octava (independientemente de que en las mediciones se empleen filtros de 1/1 octava o de 1/3 de octava) [3], y son más estrechas que las establecidas en las normas de medida del aislamiento acústico. La Tabla 1 muestra los valores máximos permitidos de DI en cada una de las normas de ensayo.

La verificación de la omnidireccionalidad de las fuentes sonoras, tal y como se ha enunciado hasta ahora, requiere disponer de una cámara anecoica y de una mesa giratoria para rotar la fuente sonora durante las mediciones. En caso de no disponer de estos elementos, se puede efectuar una verificación eficaz utilizando posiciones discretas de medida alrededor de la fuente sonora como alternativa al giro continuo de la misma y sustituyendo la cámara anecoica por un entorno de campo libre sobre un plano reflectante.

Se puede tener una aproximación razonable al promedio de la energía sonora en un ángulo deslizante de 30° promediando los niveles de presión sonora en una serie de posiciones discretas distribuidas a lo largo de un arco de circunferencia correspondiente a un ángulo central de 30° de amplitud, con tal de que los puntos de medida estén suficientemente juntos. La normativa nos propone realizar mediciones en puntos discretos a intervalos de 5° , lo que supone 72 puntos de medición. El valor de L_{360° en cada banda de frecuencia se calcula como el promedio del nivel de presión sonora en las 72 posiciones de medida. El promedio energético en cada uno de los ángulos deslizantes de 30° , $L_{30,i}$, se calcula promediando los niveles de presión sonora obtenidos en las seis posiciones contiguas de micrófono que configuran un ángulo de 30° , tres posiciones a cada lado su bisectriz. Por ejemplo, si numeramos del 1 al 72 las posiciones de medida, el valor del nivel de presión sonora para el primer ángulo deslizante se obtendría promediando los niveles de los

Frecuencia	DI_{max}	
	ISO 10140-5 ISO 16283-1 ISO 140-4	ISO 3382-1 ISO 3382-2
100	± 2 dB	± 1 dB
125	± 2 dB	
160	± 2 dB	
200	± 2 dB	± 1 dB
250	± 2 dB	
315	± 2 dB	
400	± 2 dB	± 1 dB
500	± 2 dB	
630	± 2 dB	
800	± 5 dB	± 3 dB
1000	± 8 dB	
1250	± 8 dB	
1600	± 8 dB	± 5 dB
2000	± 8 dB	
2500	± 8 dB	
3150	± 8 dB	± 6 dB
4000	± 8 dB	
5000	± 8 dB	

Tabla 1. Valores máximos permitidos de los índices de directividad para garantizar una radiación omnidireccional de la fuente sonora.

puntos 70, 71, 72, 1, 2 y 3; los del segundo ángulo deslizante serían los puntos 71, 72, 1, 2, 3 y 4, y así sucesivamente hasta completar los 72 ángulos deslizantes necesarios.

Con respecto al entorno de medida, la cámara anecoica puede ser sustituida por un campo libre sobre suelo reflectante, como el que se obtiene en exteriores cuando se está suficientemente alejado de paredes o cualquier superficie reflectante que no sea el suelo. El efecto de la reflexión del sonido en el suelo se tratará con mayor detalle en los apartados siguientes. Solamente mencionar que si el suelo es homogéneo y uniforme en toda la zona de ensayo, la perturbación que producirá dicha reflexión para cada banda de frecuencia será igual en todos los puntos de medida. Por regla general, es más fácil obtener unas condiciones favorables de homogeneidad en suelos duros, como por ejemplo suelos asfaltados que en suelos blandos, como pueden ser suelos de tierra o suelos con vegetación.

Dado que los altavoces pueden deteriorarse con el uso, es conveniente diseñar un plan de verificaciones periódicas. De acuerdo con la normativa vigente, el periodo entre verificaciones no debe exceder los dos años.

VERIFICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO PARA ENSAYOS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO DE FACHADAS

Los ensayos de aislamiento acústico de fachadas y elementos de fachada requieren un recubrimiento sonoro uniforme de la superficie de la fachada o el elemento a ensayar. De acuerdo con la norma UNE-EN ISO 140-5 [4], la directividad del altavoz debe asegurar que las diferencias del nivel de presión sonora entre dos puntos cualesquiera de la superficie de la muestra, en todas las bandas de frecuencia de interés, sean inferiores a 5 dB, medidas en campo libre sobre una superficie del mismo tamaño y orientación que la pared o elemento a ensayar. También apunta que si se aplica a muestras de gran superficie, se pueden aceptar diferencias de hasta 10 dB.

La verificación de este requisito, tal y como está enunciado, plantea varios problemas. En primer lugar, el tamaño de la muestra puede ser diferente en cada ensayo, y la orientación de la fuente sonora con respecto a la fachada depende de la altura del centro de la misma o la del elemento de fachada objeto de ensayo. La interpretación literal del texto de la norma implica que sería necesaria una verificación específica de la cobertura sonora para cada ensayo, atendiendo a las características geométricas de los elementos implicados, lo que incrementaría significativamente los costes de la medición. Lo habitual es evaluar cuál es la superficie recubierta con una dispersión de 5 dB y 10 dB en la orientación en la que el recubrimiento es más desfavorable, y para la mínima distancia permitida entre la fachada y la fuente sonora. Para cualquier otra distancia y/o orientación la superficie correctamente recubierta será mayor.

Otro problema radica en el entorno de ensayo. La norma establece que la medición hay que realizarla en campo libre, es decir en cámara anecoica. Sin embargo las dimensiones de los elementos y las distancias mínimas que hay que respetar hacen que la mayoría de las cámaras anecoicas existentes no sean suficientemente grandes para realizar las mediciones necesarias. Esto se puede solventar de diferentes formas. Una de ellas es realizar las mediciones en la cámara anecoica utilizando una geometría reducida, y extrapolar, mediante cálculos, los valores obtenidos a la geometría real. Otra posibilidad es medir, también en una cámara anecoica, la directividad de la fuente sonora. A partir de esta directividad se puede calcular la radiación sonora de la misma para cualquier superficie, sea cual sea su tamaño y orientación [5]. La Figura 3 muestra un diagrama de directividad y la distribución de niveles calculada en una superficie a partir de dicha directividad, para unas condiciones de distancia y orientación dadas.

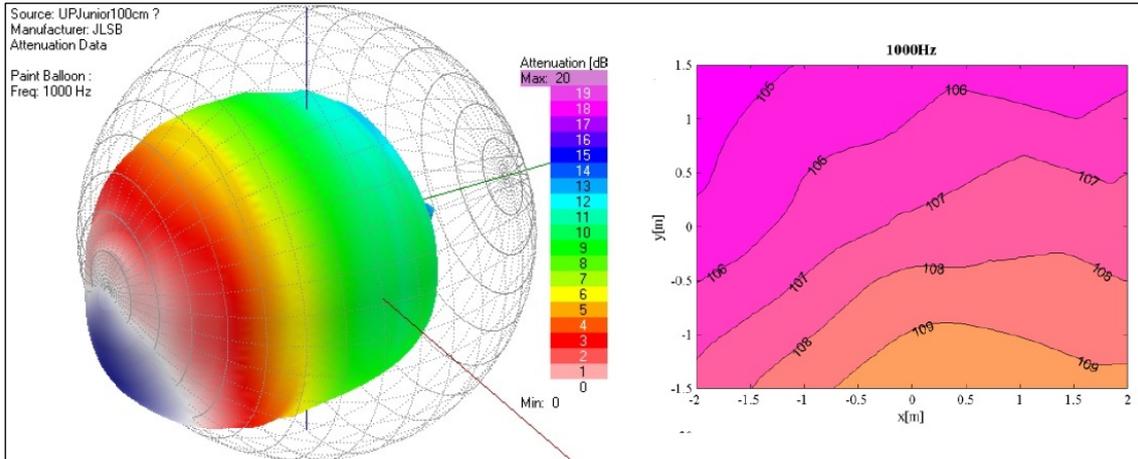


Figura 3. Directividad de una fuente sonora para la banda de 1 kHz y distribución del nivel de presión sonora sobre una superficie de 3x4 m, a una distancia $d=5$ m, para la orientación más desfavorable.

Si no se dispone de una cámara anecoica, se puede intentar realizar la verificación en el exterior, en un lugar separado de superficies reflectantes. La verificación consistiría en emitir un ruido de banda ancha y medir los niveles de presión sonora que se obtienen en una rejilla de puntos distribuidos a lo largo de una superficie hipotética que representa la fachada. El problema con el que nos encontramos es que la reflexión del suelo afecta de una manera significativa a la señal que se capta en cada uno de los puntos de medida.

Debido a que el centro acústico de la fuente sonora se encuentra a una determinada altura del suelo, a , a cada posición de medida le llegan dos señales sonoras: la señal directa y la señal procedente de la reflexión del suelo. La segunda llega al receptor con un retardo τ , correspondiente a la diferencia de caminos entre ambas señales sonoras (Figura 4).

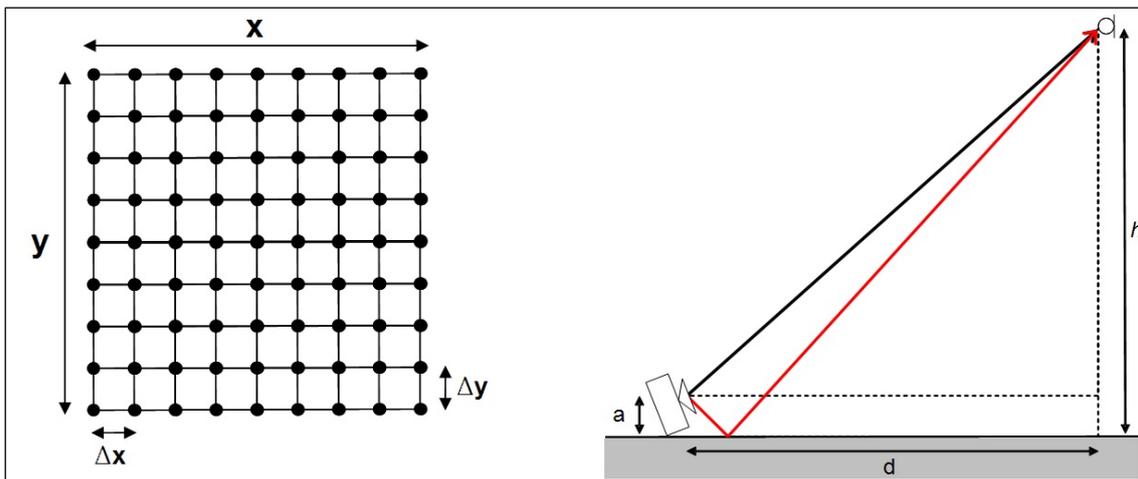


Figura 4. Rejilla de medida y diagrama de las señales sonoras que llegan a una posición de micrófono.

La combinación de la señal directa y la señal reflejada genera, en el punto de medida, un efecto denominado *filtro peine* que consiste en una alteración del espectro de la señal acústica caracterizada por una serie de máximos y mínimos en la respuesta en frecuencia de la señal recibida (Figura 5). La separación en frecuencia entre dos máximos o mínimos consecutivos depende del retardo entre ambas señales, mientras que las diferencias de nivel entre los “picos” y los “valles” dependen de la atenuación de la señal reflejada con respecto a la señal directa, estando esta atenuación condicionada por la divergencia esférica y por la absorción que se produce en la reflexión, que depende del coeficiente de absorción, α , del suelo.

Los mínimos se presentan en las frecuencias que cumplen la siguiente relación:

$$f_k = \frac{2k + 1}{2\tau} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

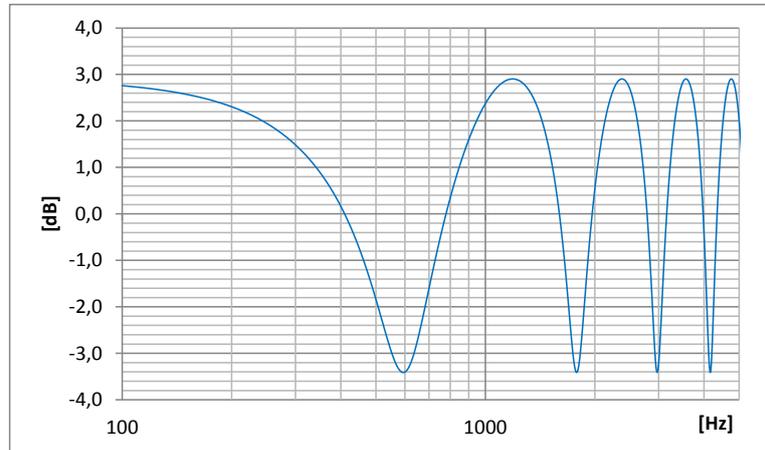


Figura 5. Ejemplo de filtro peine.

Los retardos y atenuaciones entre ambas señales son diferentes para cada uno de los puntos de la rejilla, lo que hace que las frecuencias de los máximos y los mínimos, así como las diferencias de nivel entre ambos, sean distintas en cada punto de medida. La Figura 6 muestra los filtros peine calculados para tres puntos con diferentes alturas. Se observa cómo las diferencias de nivel entre los distintos puntos, debidas solamente a la reflexión del suelo, para una determinada frecuencia pueden ser del mismo orden de magnitud, o incluso superiores a la tolerancia establecida por la norma de ensayo.

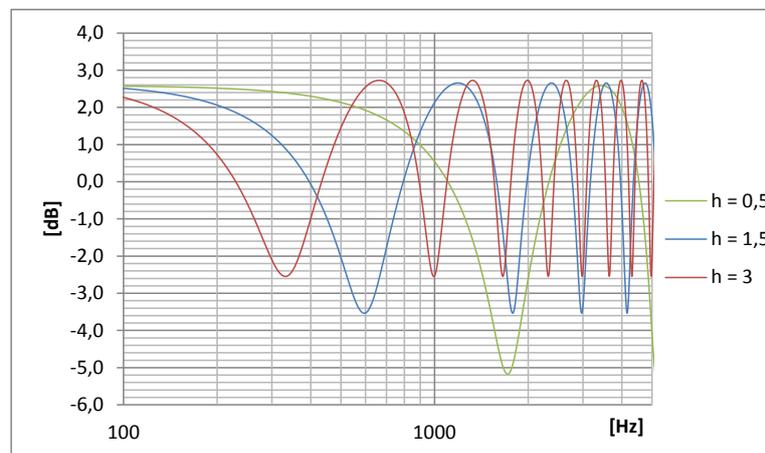


Figura 6. Filtros peine calculados para tres alturas diferentes. Los parámetros de cálculo utilizados son $a=0,5$ m, $d=5$ m y $\alpha=0,2$.

Teniendo en cuenta que en las mediciones de verificación se combinarán los efectos de la directividad de la fuente sonora (que son los que tratamos de investigar) con los de la reflexión del suelo, es conveniente minimizar en lo posible estos últimos. Como se ha comentado anteriormente, las variaciones de nivel encontradas en el filtro peine dependen de la atenuación de la señal reflejada con respecto a la señal directa. Dicha atenuación será superior cuanto más absorbente sea el suelo sobre el que se realiza el ensayo. La Figura 7 presenta los filtros peine calculados para un punto determinado, considerando diferentes coeficientes de absorción del suelo ($\alpha=0,1$, $\alpha=0,5$ y $\alpha=0,8$). Se puede apreciar que, en este ejemplo, mientras las diferencias de nivel entre bandas de frecuencia para $\alpha=0,1$ (asimilable a un suelo rígido y

liso) superan los 6 dB, cuando el coeficiente de absorción del suelo es alto ($\alpha=0,8$) estas diferencias se mantienen por debajo de 2 dB.

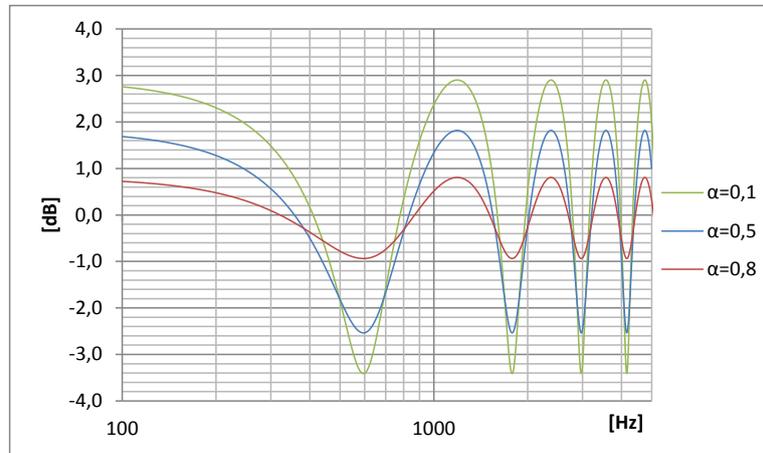


Figura 7. Efecto de la absorción del suelo en el espectro de la señal recibida en una posición de medida. Los parámetros de cálculo utilizados son $h=1,5$ m, $a=0,5$ m y $d=5$ m.

CONCLUSIONES

Se han revisado los procedimientos de verificación de la omnidireccionalidad de las fuentes sonoras y del recubrimiento sonoro de la muestra de ensayo. Ambas verificaciones deberían realizarse en condiciones de campo libre; no obstante se incluyen procedimientos alternativos de verificación que, si se controlan las condiciones del ensayo, pueden arrojar resultados satisfactorios.

REFERENCIAS

- [1] ISO/IEC 17025:2005, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*, Genève: International Organization for Standardization, 2005.
- [2] *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms*, Paris: Bureau International des Poids et Mesures; , 2012.
- [3] ISO 3382-1:2009, *Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 1: Performance spaces*, Genève: International Organization for Standardization, 2009.
- [4] 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*, Genève: International Organization for Standardization, 1998.
- [5] J. L. Sánchez Bote, A. Pedrero González y J. J. Gómez Alfageme, «Procedure for verification of sound source coverage over façades according to the International Standard ISO 140–5,» *Applied Acoustics*, vol. 73, nº 9, pp. 977-985, 2012.