

MEDIDA DE AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO CON SEÑALES IMPULSIVAS

PACS: 43.55.Rg

Granados, Leroy Otto; Machimbarrena Gutiérrez, María
Universidad de Valladolid
Dpto. Física Aplicada, ETS Arquitectura
Av. Salamanca s/n
47014 Valladolid
España
leroyotto@outlook.com

Palabras Clave: aislamiento acústico; nuevos métodos; pistola; ISO 18233

ABSTRACT

This communication presents a comparative study of acoustical measurements using broadband impulses to determinate the airborne sound insulation index. The results of this experimental method are compared with those obtained by ISO 16283-1 and ISO 18233 normalized procedures. The consistency, the dispersion of sampling measurements and the influence of the excitation signal characteristics are discussed, based on three study cases measured in a docent building.

RESUMEN

En esta comunicación se presenta un estudio del procedimiento y de los resultados obtenidos en ensayos que emplean únicamente señales impulsivas de banda ancha para evaluar el aislamiento a ruido aéreo de cerramientos. Los resultados de estos ensayos se comparan con los obtenidos mediante los métodos normalizados descritos en ISO 16283-1 e ISO 18233. A la vista de los resultados, se analizan las ventajas y limitaciones de este procedimiento experimental de medida, la coherencia entre los métodos y la reproducibilidad de las medidas de muestreo, obtenidas a partir de tres casos de estudio en un edificio de uso docente.

1. INTRODUCCIÓN

La normativa internacional contempla procedimientos de ensayo de aislamiento a ruido aéreo basados en tres diferentes tipos de señales acústicas de referencia: señales aleatorias (series ISO 10140, ISO 16283 e ISO 15186) y señales MLS o barridos sinusoidales (ISO 18233). La especificidad de cada tipo de señal acústica y sus requisitos de aplicación se definen en las respectivas normas de ensayo, que invariablemente requieren el uso de un altavoz para la reproducción de la señal. La dificultad relacionada con la excitación se puede agravar al medir cerramientos con altos niveles de aislamiento o en ambientes con elevado nivel de ruido de fondo. En estas circunstancias, resulta difícil obtener una adecuada relación señal-ruido y cumplir los requisitos de la norma ISO 16283-1.

Con los métodos propuestos en la norma ISO 18233, se busca solventar estas limitaciones por medio de procedimientos alternativos de excitación y medición^[1] dado que introduce un procedimiento de medida basado en la obtención de la respuesta al impulso del recinto, preferiblemente mediante la excitación con señales impulsivas de alta calidad o señales deterministas. Cuando se emplea una señal de tipo barrido sinusoidal (ISO 18233 - Anexo B), la idea es que la excitación se distribuya sobre un periodo para aumentar la energía total radiada en cada frecuencia, que varía a cada instante del barrido de periodo T , y se puede interpretar como un "impulso sonoro estirado en el tiempo".^[2] El uso del barrido de tonos sinusoidal permite llevar el rango dinámico al máximo determinado por las características físicas de la cadena de medida, y obtener una relación señal-ruido superior a la que se obtiene con el método basado en MLS. En general, la aplicación de esta norma permite extender el rango dinámico de medida y el consecuente aumento de la relación señal-ruido en el recinto receptor. Al mejorar la relación señal-ruido, especialmente a bajas frecuencias, se elimina la necesidad de niveles de potencia sonora extremadamente altos, lo puede resultar en distorsiones no lineales del altavoz.

Por otra parte, además de las señales aleatorias y deterministas usadas en los procedimientos normalizados de medida, las señales impulsivas pueden ser eficaces en la definición de la diferencia de niveles entre recintos.^[3] El método de la señal impulsiva para mediciones del aislamiento acústico que se ha utilizado en este trabajo, se basa en los procedimientos del método normalizado por la ISO 16283-1, con la diferencia de que la señal de excitación es un impulso sonoro, y que el parámetro de medida para caracterizar su nivel acústico es el nivel de exposición sonora (SEL), con lo que se determina la diferencia de niveles entre recintos receptor y emisor.^[4]

En el trabajo que se presenta, se comparan medidas realizadas según los métodos normalizados ISO 16283-1 e ISO 18233, con medidas realizadas de acuerdo a un método alternativo de medición que usa señales de excitación impulsivas a partir de disparos de una pistola de fogeo. Se analiza la coherencia entre métodos de medición, la dispersión de las medidas de muestreo y la influencia de las características de la señal de excitación en los resultados. Todos los detalles de los ensayos realizados pueden encontrarse en el trabajo de Granados [4].

2. MÉTODOS DE MEDIDA DEL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO EMPLEADOS

- Método Clásico: método según la norma ISO 16283-1;
- Método de la Función de Transferencia: método según los requisitos especificados en la norma ISO 18233. En este trabajo se elige medir utilizando barridos sinusoidales exponenciales (ISO 18233-BS, Anexo normativo A), dadas sus ventajas en mediciones de acústica arquitectónica;
- Método de la Señal Impulsiva: método según el procedimiento presentado en el artículo de Deželak et al.[3], basado en la norma ISO 16283-1

El método de la señal impulsiva se basa en la medición de la diferencia de nivel de exposición sonora SEL de una secuencia de disparos. El método sigue los criterios de muestreo espacial del método clásico descrito en la ISO 16283-1, pero aplica el teorema de reciprocidad de Green para invertir los puntos de excitación y medición, resultando en un número mínimo de cinco puntos de disparo en el recinto emisor para cada posición de micrófono. Se usan dos posiciones de medición en el recinto emisor y otras dos en el receptor. Se mide el Leq,T en un periodo suficiente para realizar una secuencia de 5 disparos con la pistola de fogeo por cada posición de micrófono, en un rango de bandas de frecuencia de tercio de octava desde 50 Hz a 5 kHz. Las medidas se convierten posteriormente a nivel de exposición sonora SEL, de acuerdo con el tiempo de promedio T de cada medición. La diferencia de niveles para cada posición de micrófono "j" se determina de acuerdo a la ecuación 1, donde el subíndice "e" alude

a la sala emisora y el subíndice “r” a la receptora. La diferencia de niveles, se calcula haciendo la correspondiente media aritmética según ecuación 2 (en este caso para dos posiciones de micrófono.)

$$D_j = SEL_{ej} - SEL_{rj} \quad Ec. 1$$

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad Ec. 2$$

El Método de la Señal Impulsiva anteriormente descrito, se ha empleado así mismo con las siguientes variantes en este estudio:

(Método) Impulsivo Dividido: Análogo a lo descrito anteriormente pero en vez de determinar un valor de nivel de exposición sonora para una secuencia de disparos, se mide cada punto de emisión por separado, con lo cual el periodo de medida Leq,T será menor. Las medidas se convierten a nivel de exposición sonora SEL, de acuerdo con el tiempo de promedio T de cada medición. A partir de los niveles de exposición sonora tomados, se realiza un promedio de los niveles en el recinto emisor (Ec.3) y receptor (Ec 4) para la j -ésima posición de micrófono de los m puntos de disparo (5 posiciones de disparo en concreto):

$$\overline{SEL}_{ej} = 10 \log \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m 10^{0,1 SEL_{ej,i}} \quad Ec. 3$$

$$\overline{SEL}_{rj} = 10 \log \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m 10^{0,1 SEL_{2j,i}} \quad Ec. 4$$

Donde \overline{SEL}_{ej} es el promedio de niveles de exposición sonora tomados en la j -ésima posición de un total de m puntos de medición del recinto emisor, y \overline{SEL}_{rj} es el promedio correspondiente en el recinto receptor.

La diferencia de niveles para cada posición de micrófono “j” se determina y total se determinan:

$$D_j = \overline{SEL}_{ej} - \overline{SEL}_{rj} \quad Ec. 5$$

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad Ec. 6$$

(Método) Impulsivo 16283-1: Ensayo semejante al descrito por Deželak et al.[3], pero siguiendo estrictamente los criterios de la ISO 16283-1 en cuanto al muestreo de puntos de excitación y medición de la sala. Con este ensayo se busca comparar los resultados de la inversión de los puntos de fuente y micrófono que propone el método, basado en la reciprocidad energética de la ecuación de Green del espacio libre armónico, con las posiciones de excitación y medición que recomienda la norma ISO 16283-1 (Método “Impulsivo ISO 16283-1”), para verificar la validez de esta inversión en los ensayos de aislamiento acústico.

3. PISTOLAS DE FOGUEO COMO FUENTES DE RUIDO IMPULSIVO

Estudios comparativos anteriores sobre la emisión sonora de pistolas de fogueo de diferentes calibres^[5] concluyen que una pistola de calibre 9 mm presenta excelentes resultados como fuente de ruido impulsivo en ensayos de acústica arquitectónica, en especial a bajas frecuencias, y una variación de la directividad inferior o igual a $\pm 2,5$ dB, incluso a altas frecuencias, en las que las fuentes en general presentan un factor de directividad de emisión más elevado. Concretamente, se ha demostrado que la emisión sonora de un disparo de pistola en campo libre sobre una superficie reflectante muestra un comportamiento omnidireccional de la señal impulsiva, si se apunta el cañón del arma hacia arriba, por encima de la cabeza del operador^[6]. Además, una estimación del nivel de potencia sonora de una pistola de fogueo de 9 mm, de acuerdo con la norma ISO 3744 realizada en bandas de tercio de octava desde 50 Hz a 5 kHz, resulta en un nivel de potencia global de 131,8 dB.^[3]

Las principales ventajas del uso de disparos de pistolas de fogueo como señal de excitación son:^[7]

- Emisión acústica significativamente mayor a bajas frecuencias, principalmente en las bandas de 50, 63 y 80 Hz, si se compara con las prestaciones de una fuente de ruido aleatorio convencional;
- Se trata de una fuente autosuficiente, relativamente barata, y que se utiliza en mediciones de parámetros de acústica de salas;
- Es una fuente de ruido fácil de transportar, instalar, mantener y operar.

4. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

Las medidas experimentales se han realizado en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Valladolid (ETSA-UVA). Se escogieron tres pares de recintos para determinar la diferencia de niveles, aplicando cada uno de los métodos de medida: entre salas de juntas de la escuela, entre aulas, y entre la zona común y la biblioteca del departamento de Física Aplicada. Todos los recintos estaban amueblados y sin ocupación durante las mediciones.

El cerramiento medido en el Departamento de Física Aplicada tiene una puerta que comunica la biblioteca con la zona común, por lo que se espera un nivel de aislamiento menor, comparado con los demás casos de estudio. La descripción exacta de los cerramientos que separan cada par de recintos no ha sido necesaria, ya que se pretende comparar las medidas con diferentes procedimientos de ensayo de un mismo cerramiento.

Las figuras 1, 2 y 3 representan las salas de ensayo, así como los puntos de excitación y medida en función del método de medida utilizado.

Por lo que respecta a la instrumentación, además de los equipos propios de los ensayos clásicos de aislamiento acústico, para el método de la señal impulsiva se ha utilizado una pistola semiautomática de 9 mm Ekol Sava EK26 y balas detonadoras.

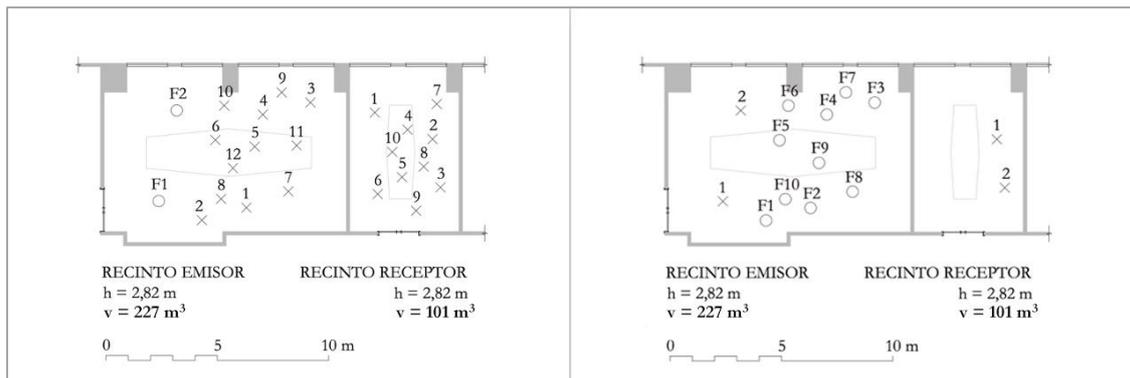


Fig. 1: Caso de estudio 1 - Salas de juntas, ETSA-UVA:

- Métodos normalizados: puntos de excitación (F1 y F2) y puntos de medida en el recinto emisor y receptor.
- Método señal impulsiva: puntos de excitación en el recinto emisor (F1-10), y puntos de medida (1 y 2).

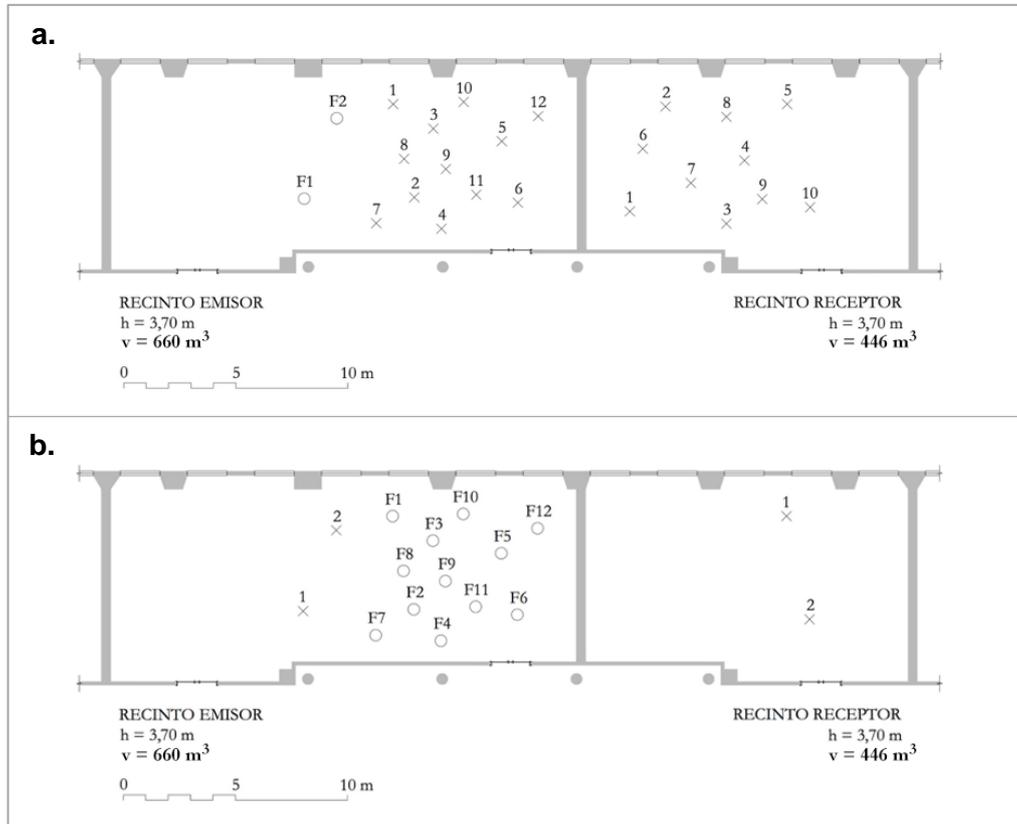


Fig. 2: Caso de estudio 2 - Aulas, ETSA-UVa:

- a. Métodos normalizados: puntos de excitación (F1 y F2) y puntos de medida en el recinto emisor y receptor.
- b. Método señal impulsiva: puntos de excitación en el recinto emisor (F1-12), y puntos de medida (1 y 2).

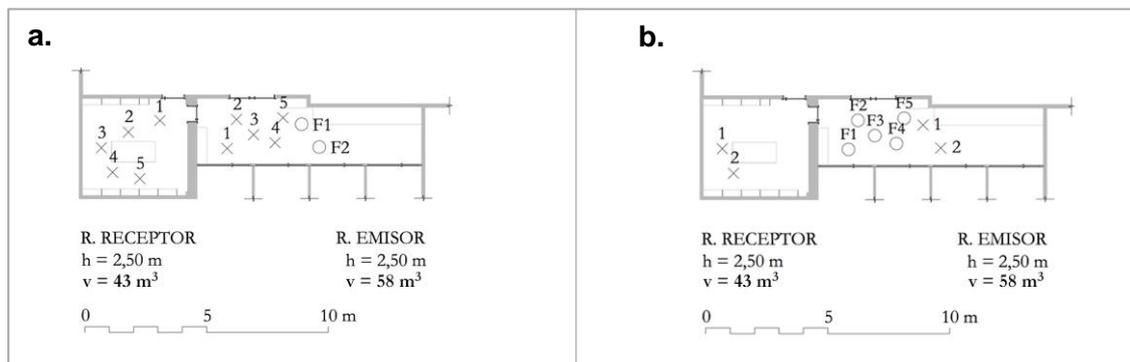


Fig. 3: Caso de estudio 3 - Departamento de Física Aplicada, ETSA-UVa. Se toma la zona común como recinto emisor y la biblioteca como recinto receptor:

- a. Métodos normalizados: puntos de excitación (F1 y F2) y puntos de medida en el recinto emisor y receptor.
- b. Método señal impulsiva: Puntos de excitación en el recinto emisor (F1-5), y puntos de medida (1 y 2).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La primera parte del estudio compara los resultados obtenidos por el método de la ISO 16283-1 con los resultados que corresponden a las tres variaciones del método de la señal impulsiva (Impulsivo, Impulsivo Dividido e Impulsivo ISO 16283-1). A continuación se estudia la

desviación típica de los niveles de presión promedio con la fuente impulsiva, con el fin de evaluar de qué manera pueden afectar a los resultados obtenidos anteriormente.

5.1 Estudio Comparativo de los Métodos Empleados

Las figuras 4-7 presentan los resultados obtenidos en los tres pares de recintos estudiados y usando los tres métodos de medida propuestos: ISO 16283-1, Función de Transferencia mediante barrido senoidal y Ruido Impulsivo con las variantes anteriormente descritas. En cada figura se realiza un tipo de comparación diferente.

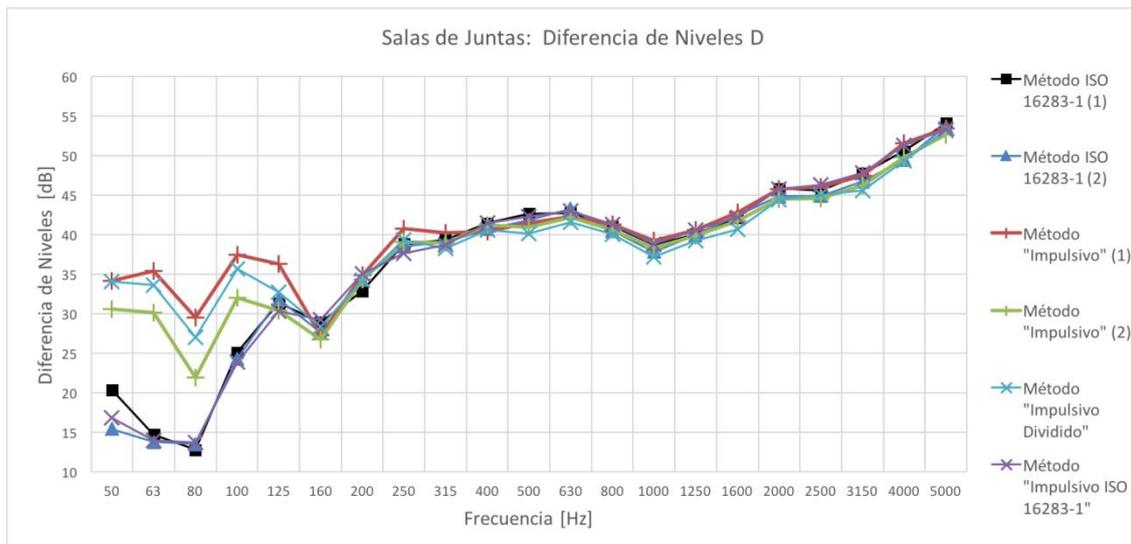


Fig. 4: Salas de juntas. Comparación de la Diferencia de Niveles D – Método ISO 16283-1 y Métodos con la señal impulsiva.

La figura 4 compara, para la sala de juntas, los resultados obtenidos en seis ensayos, de los cuales tres siguen el patrón de muestreo de presión descrito en la ISO 16283-1 y tres se ajustan al patrón de muestreo en el que se invierten las posiciones de fuente y receptor. Se observa que, por debajo de la banda de 160 Hz, existe una significativa incoherencia entre los resultados, con diferencias de hasta 20 dB en algunos casos. Aparecen dos tendencias por debajo de 160 Hz: la de los métodos que se ciñen al muestreo espacial propuesto por la ISO 16283-1, incluyendo el método "Impulsivo 16283-1" y la de los métodos que invierten las posiciones de fuente y receptor. La inversión de los puntos de excitación y medición disminuye el número de mediciones no correlacionadas en las medias-bajas frecuencias, puesto que el muestreo del campo acústico modal se reduce a dos puntos por recinto. Aunque este método aumente proporcionalmente el número de posiciones de excitación, la posición de la fuente no altera significativamente la formación de los modos propios de la sala, que predominan por debajo de la frecuencia de corte de la sala. Se verifica que la dispersión de las medidas es significativa por debajo de la frecuencia de corte, que en este recinto es aproximadamente igual a 100 Hz.

Por lo anteriormente expuesto, parece que la elevada dispersión de las medidas a bajas frecuencias puede ser debida a la reducción del número de posiciones de micrófono a dos posiciones en cada recinto, frente a las 10 empleadas por el método de la ISO 16283-1. Se refuerza con ello la idea de la necesidad de realizar un muestreo más representativo del campo sonoro. A partir de la banda de 160 Hz, la coherencia entre métodos es satisfactoria, con una diferencia máxima de 4 dB entre los métodos.

En la figura 5 se comparan los resultados entre todos los métodos de medición, pero siempre ajustándose al muestreo espacial de puntos de medición de acuerdo con la norma ISO 16283-1:

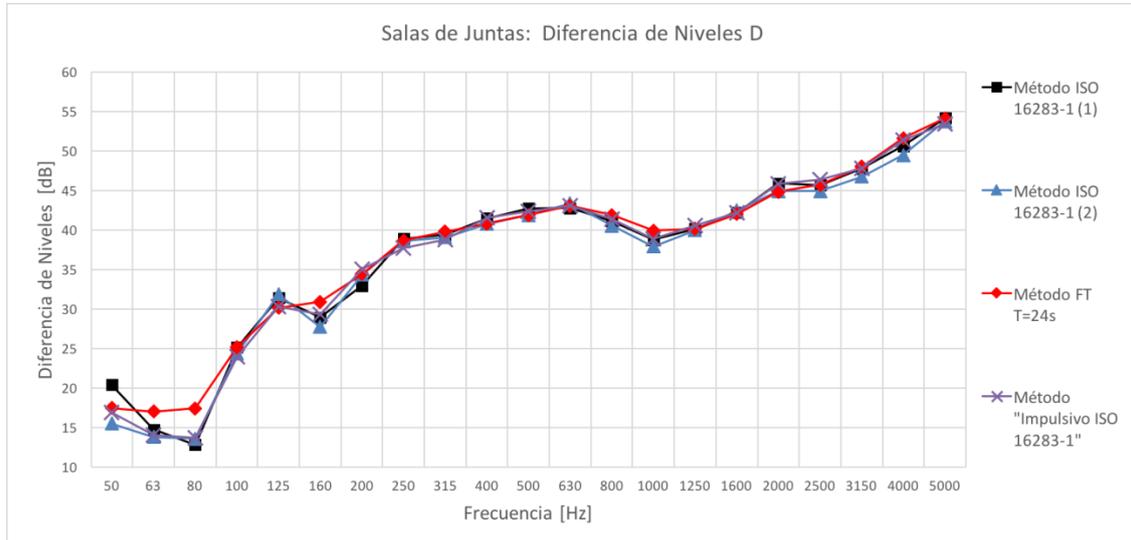


Fig. 5: Salas de juntas. Comparación de la Diferencia de Niveles D entre métodos.

La coherencia entre todos los métodos es alta por encima de los 80 Hz, con una diferencia de niveles máxima de aproximadamente 4 dB, en la banda de 160 Hz. En las bajas frecuencias, por debajo de los 100 Hz, se observa una diferencia de resultados entre el método clásico y los otros dos métodos, de aproximadamente 5 dB.

La figura 6 muestra, para el par de recintos de aulas, los resultados obtenidos midiendo con todos los tres métodos propuestos, incluyendo la variante "Método "Impulsivo ISO 16283-1". Los resultados indican una coherencia satisfactoria, por encima de los 80 Hz, entre todos los métodos de medida empleados, encontrando una diferencia de niveles máxima de aproximadamente 3 dB en alguna banda de frecuencia.

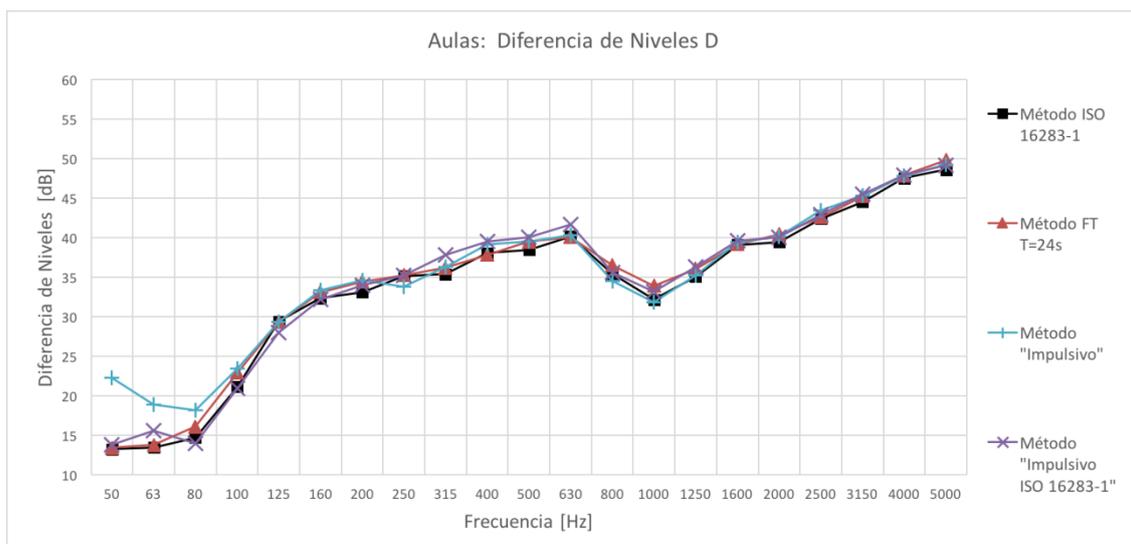


Fig. 6: Aulas. Comparación de la Diferencia de Niveles D entre métodos.

En este caso de estudio, la frecuencia de corte del recinto emisor es de aproximadamente 63 Hz. De manera similar a lo ocurrido en el caso anterior en las salas de juntas, la variante del método con señales impulsivas que realiza el muestreo espacial de las medidas según la ISO 16283-1 presenta una mejor coherencia si se compara con los demás métodos de medición normalizados.

En el tercer caso de estudio, realizado en el Departamento de Física, se han utilizado los mismos métodos de medida utilizados en las aulas, a excepción del Método “Impulsivo”. Los resultados se presentan en la Fig. 7 a continuación:

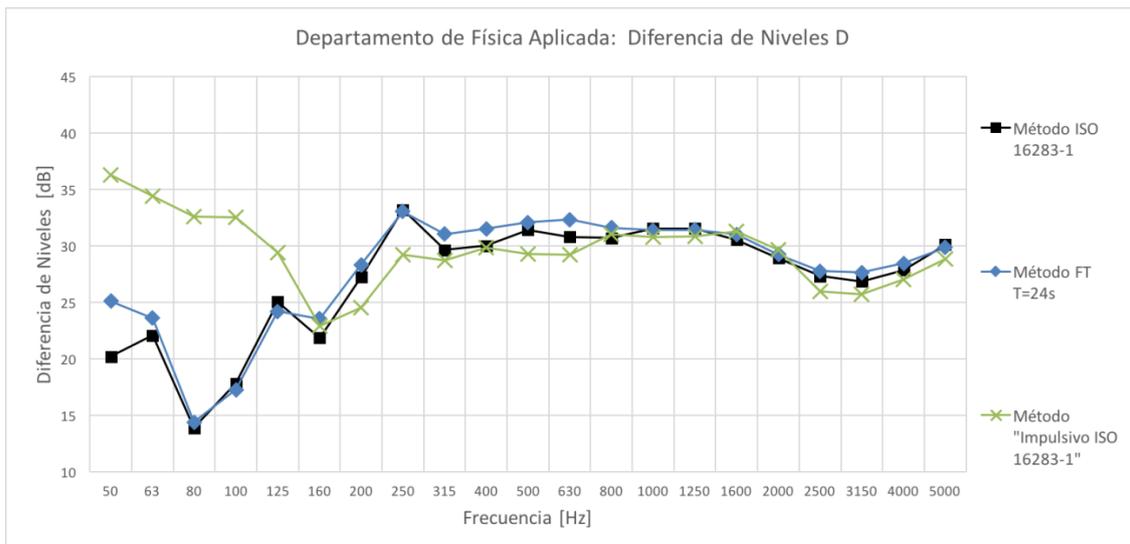


Fig. 7: Departamento de Física Aplicada. Comparación de la Diferencia de Niveles D entre métodos.

En este estudio de caso, los volúmenes de los recintos son relativamente pequeños en comparación con aquellos ensayados anteriormente, y se aproximan más a la escala de un recinto de una vivienda típica. A diferencia de los demás, se observa que el resultado menos coherente en relación al conjunto de medidas es el del Método “Impulsivo ISO 16283-1”. Aunque la coherencia entre los demás métodos es aceptable – con una diferencia máxima de niveles entre métodos de medida de 5 dB, en la banda de 50 Hz – la dispersión del conjunto de métodos utilizados en esta serie de mediciones es elevada por debajo de la banda de 160 Hz.

Dado que en los recintos estudiados anteriormente el Método “Impulsivo ISO 16283-1” presentaba muy buena convergencia con los otros dos métodos normalizados, cabe pensar que la desviación observada pueda ser debida a la propia generación del campo sonoro en recintos pequeños al usar la fuente impulsiva. Teniendo en cuenta el reducido volumen del recinto emisor de este caso de estudio en comparación a los demás, y el nivel de potencia sonora que emite un disparo de la pistola de foguero de calibre 9 mm, se cuestiona si las divergencias encontradas en este caso para el Método “Impulsivo ISO 16283-1” pudieran deberse al hecho de que los puntos de recepción en la sala emisora se encontraran en el campo próximo de la fuente. Para verificar esta hipótesis se procede a estudiar detenidamente los datos obtenidos al realizar el muestreo espacial en los tres pares de recintos mediante el método “Impulsivo ISO 16283-1”, lo cual se detalla en el epígrafe siguiente.

5.2 Desviación Típica de los Niveles Promedio

A la vista de los datos de muestreo del campo sonoro, se observó que la señal impulsiva era la que presentaba valores de desviaciones típicas del nivel de presión sonora en el recinto emisor más elevadas, de entre los tres métodos estudiados. Es por ello que este estudio se ciñe a

dicho tipo de señal. En la Figura 8 se comparan las desviaciones típicas de los niveles de presión sonora registrados para los tres pares de recintos estudiados, en el recinto emisor:

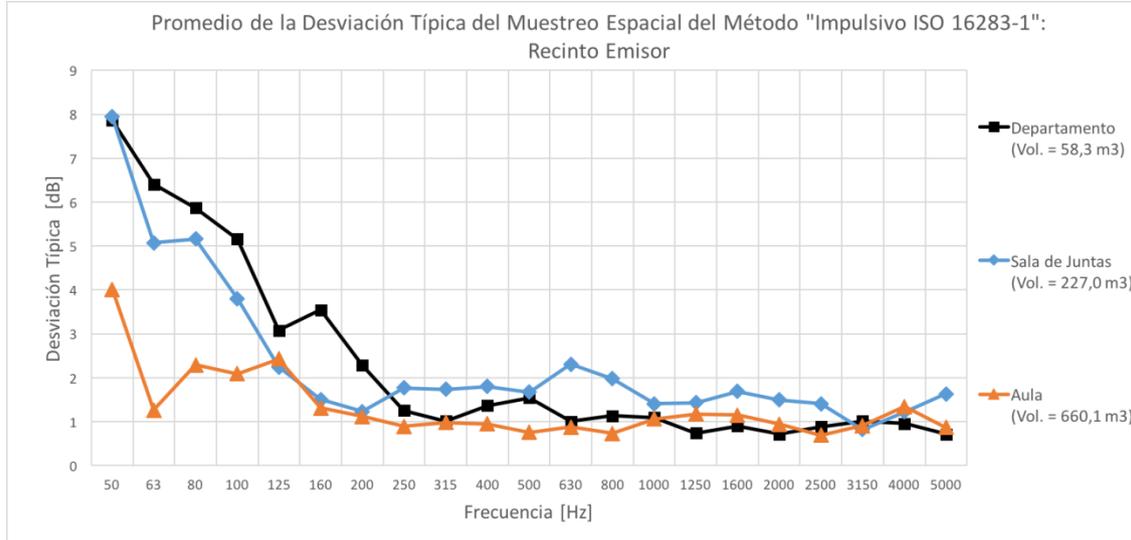


Fig. 8: Promedio de los valores de desviación típica del muestreo espacial, en los recintos emisores de los ensayos con el Método "Impulsivo ISO 16283-1": comparación entre casos de estudio.

Se observa la disminución de la desviación típica media, en las bandas de medias-bajas frecuencias, en función del incremento del volumen de los recintos emisores medidos. La Tabla 1 presenta una comparación de las distancias de los puntos de excitación y de medición, para los tres casos de estudio:

Tabla 1: Comparación de las distancias en el recinto emisor de cada caso de estudio.

| Recinto Emisor Caso de Estudio | Distancia Micrófono - Fuente | | | Promedio de la Menor Distancia Mic - Pared | Volumen | Superficie | Frecuencia de Corte (fs) |
|-----------------------------------|------------------------------|-------|--------------|---|----------|------------|-----------------------------|
| | Min | Max | Promedio | | | | |
| Aula | 3,5 m | 9,5 m | 6,5 m | 2,3 m | 660,1 m³ | 588,8 m² | 63 Hz |
| Sala de Juntas | 2,1 m | 8,1 m | 4,7 m | 2,0 m | 227,0 m³ | 273,8 m² | 100 Hz |
| Z. Común Depto. | 0,8 m | 3,8 m | 2,4 m | 0,9 m | 58,3 m³ | 106,4 m² | 200 Hz |

Al comparar la gráfica de la figura 8 con las frecuencias de corte estimadas de la Tabla 1 se observa que, no sólo la desviación típica de las medidas a medias-bajas frecuencias aumenta a medida que disminuye el volumen de la sala, sino que también lo hace la pendiente de las curvas de dispersión en dirección a las bajas frecuencias. Este comportamiento es claro a partir de la banda más próxima a la frecuencia de corte de cada sala, que teóricamente delimita el rango de frecuencias del campo acústico donde predomina el comportamiento modal, cuya distribución de presiones es bastante irregular.

En el recinto emisor del Departamento, donde las medidas con el Método "Impulsivo ISO 16283-1" presentan las mayores desviaciones típicas de entre todos los casos de estudio, se debe señalar que el "promedio de las distancias micrófono-fuente" y el "promedio de la menor distancia entre cada posición de micrófono y un cerramiento de la sala" (Tabla 1) son menores que en los demás casos de estudio. Esta situación puede contribuir a la baja repetibilidad de las medidas, ya que los puntos de medición están simultáneamente más cerca de la fuente de excitación y de las superficies reflectantes que conforman el recinto. Estas zonas son más susceptibles a tener altos niveles y grandes variaciones de la presión sonora en función del

punto de medición, en el rango de frecuencias correspondiente al campo modal de la sala, excitada por una pistola de fogeo cuyo nivel de potencia es excesivamente elevado para un recinto con un volumen tan reducido, en un ensayo típico de aislamiento acústico in situ.

6. CONCLUSIONES

A partir del estudio experimental llevado a cabo se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El método de medida “Impulsivo ISO 16283-1” que usa como fuente de excitación una pistola de fogeo presenta una excelente coherencia con los métodos normalizados descritos en las normas ISO 16283-1 e ISO 18233 (barrido senoidal), excepto en recintos excesivamente pequeños, donde las dimensiones limitadas pueden provocar que los puntos de muestreo del nivel de presión sonora se encuentren en el campo próximo de la fuente impulsiva.
- El método de medida “Impulsivo” en que se intercambian las posiciones de fuente y micrófono, también presenta una coherencia satisfactoria con los métodos normalizados, aunque en este caso sólo por encima de la frecuencia de corte de los recintos.
- La baja repetibilidad de las medidas de un disparo de pistola en campo reverberante, y por debajo de la frecuencia de corte de la sala, apunta hacia la necesidad de profundizar la investigación sobre su adecuación en ensayos de acústica, especialmente en recintos de volumen reducido.
- El método de la señal impulsiva ofrece la ventaja de realizar la medición con más rapidez: aproximadamente un tercio del tiempo necesario para realizar un ensayo según el método de la norma ISO 16283-1. Además, las mismas medidas se pueden utilizar para determinar el tiempo de reverberación, disminuyendo aún más el tiempo total del ensayo.
- Se recomienda profundizar en el estudio y posible normalización de los ensayos de aislamiento empleando una fuente impulsiva análoga a la empleada en este estudio, ya que además de reducir el tiempo de ensayo y trabajar con una fuente de dimensiones y peso reducidos, proporcionaría suficiente energía a frecuencias medias y altas como para evitar problemas de relación señal ruido en casos de ensayarse cerramientos con elevado aislamiento.

REFERENCIAS

- [1] González A. Evaluación e implementación de una metodología para medición de aislamiento acústico entre recintos utilizando barridos frecuenciales. *Son Y Acústica Univ Tecnológica Chile* Ina 2008:41–5.
- [2] Müller G, Möser M. *Handbook of engineering acoustics*. 1st ed. New York: Springer; 2013.
- [3] Deželak F, Čurović L, Čudina M. Determination of the sound energy level of a gunshot and its applications in room acoustics. *Appl Acoust* 2016;105:99–109.
- [4] Granados LO. *Aplicación de señales deterministas e impulsivas en los nuevos métodos de medición del aislamiento acústico a ruido aéreo en edificios*. Universidad de Valladolid, 2016.
- [5] Lamothe MJR, Bradley JS. Acoustical characteristics of guns as impulse sources. *Can Acoust* 1985;13:16–24.
- [6] Hak CCJM, Wenmaekers RHC, Van Luxemburg LCJ. Measuring room impulse responses: Impact of the decay range on derived room acoustic parameters. *Acta Acust United with Acust* 2012;98:907–15.
- [7] Prasad SD. Investigation of explosives as a sound source for field measurements of sound insulation in buildings. *Inter Noise 1998 Proc.*, Christchurch: 1998, p. 1–4.