

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

ÍNDICE DEL PROYECTO

1. Memoria justificativa del proyecto.....	6
1.1 Introducción.....	6
1.2 Descripción del proyecto.....	9
1.3 Memoria justificativa.....	9
2. Fundamentos de la medida de Intensidad sonora.....	11
2.1 Introducción.....	11
2.2 Definición de parámetros acústicos.....	11
2.2.1 Presión sonora	
2.2.2 Potencia sonora	
2.2.3 Intensidad sonora	
2.3 Relación entre potencia, presión e intensidad acústica.....	13
2.4 Principios básicos de la intensidad sonora.....	14
2.5 Campos activos y reactivos.....	16
3. Teoría de la medición de la intensidad sonora.....	18
3.1 Sondas del tipo p-p.....	18
3.2 Procesado de la señal con una sonda del tipo p-p.....	19
3. 2. 1. Método directo	
3.3 Errores en medición con las sondas tipo p-p.....	21
3.3.1 Error por aproximación de fuentes finitas	
3.3.2 Error debido al desfase entre los canales	
4. Teoría del aislamiento.....	25
4.1 Aislamiento de una pared simple homogénea: Ley de masas.....	25
4.2 Normativa ISO 140-4. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Mediciones in situ del aislamiento aéreo entre locales.....	28
4.2.1 Ecuaciones y condiciones de campo	

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

4.3 Normativa ISO-15186-2. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción utilizando intensidad sonora.....	29
4.3.1 Ecuaciones y condiciones de campo	
4.3.2. Aislamiento a bajas frecuencias. Corrección de Waterhouse	
5. Procedimientos de medida de aislamiento.....	33
5.1 Ensayo de aislamiento por medidas de presión acústica. Norma ISO 140-4.....	33
5.2 Ensayo de aislamiento en los edificios y en los elementos de construcción. Norma ISO 717-1.....	35
5.3 Ensayo de aislamiento por medidas de intensidad acústica. Norma ISO 15186.....	37
5.3.1 Medición por puntos	
5.3.2 Medición por barrido	
6. Descripciones de los equipos de medida.....	43
6.1 Medición de la intensidad acústica.....	43
6.2 Medición de la presión acústica.....	46
6.3 Descripción del software de medida.....	47
7. Instrucciones del software de medida.....	48
7.1 Guía de utilización del programa dbBATI.....	48
7.2 Guía de utilización del programa dbFA.....	57
7.2.1 Measurement session	
7.2.2 ISO 9614 Session	
8. Resultados.....	74
8.1 Ensayo de aislamiento mediante medidas de presión.....	76
8.1.1 Discusión de resultados	
8.2 Ensayo de aislamiento mediante medidas de intensidad.....	80

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

8.2.1 Ensayos de aislamiento en la pared

8.2.1.1 Evaluación del método de medida

8.2.1.2 Evaluación del número de sub-áreas medidas

8.2.1.3 Evaluación de método de medida de intensidad

8.2.1.4 Evaluación de la distancia de medida

8.2.1.5 Influencia de la densidad de barrido

8.2.1.6 Influencia de la sala de ensayo

8.2.2 Ensayos de aislamiento por intensidad. Aislamiento de materiales e influencia de otros parámetros

8.2.2.1 Influencia de los materiales de la superficie de medición

8.2.2.2 Evaluación de la posición de la fuente

8.2.2.3 Evaluación del ruido de fondo

8.2.2.4 Evaluación del método de medida

9. Conclusiones.....	103
9.1 Conclusiones de la comparación del método de presión.....	103
9.2 Conclusiones de los parámetros del método de intensidad.....	104
10. Bibliografía y normativa.....	105
10.1 Bibliografía.....	105
10.2 Normativa.....	106

CONTENIDO DEL CD-ROM

1. CONTENIDO DEL PROYECTO

- 1. ÍNDICE
- CAPÍTULO 1
- CAPÍTULO 2
- CAPÍTULO 3
- CAPÍTULO 4
- CAPÍTULO 5
- CAPÍTULO 6
- CAPÍTULO 7
- CAPÍTULO 8
- CAPÍTULO 9
- CAPÍTULO 10

2. MANUAL DEL SOFTWARE DE MEDIDA

- Manual del software dBFa32 en español
- Manual de la sonda de intensidad

3. NORMATIVA

- DBHR
- GUÍA DBHR
- UNE-ISO 15186-2
- UNE-ISO 140-4
- UNE-ISO 717-1

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

1. MEMORIA JUSTIFICATIVA DEL PROYECTO

1.1 INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica producida por la actividad humana ha aumentado de forma espectacular en los últimos años. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), 130.000.000 de habitantes de sus países miembros, se encuentran con un nivel sonoro superior a 65 decibelios, limite aceptado por la O.M.S. y otros 300.000.000 residen en zonas de incomodidad acústica entre 55-65 dB.

Así pues, el silencio se ha convertido en un bien escaso en nuestras vidas. El desarrollo industrial, económico y cultural, la expansión urbanística, el aumento desenfadado del parque automovilístico, entre otros, han contribuido a transformar una amplia gama de sonidos, rica en sus inicios, en contaminación acústica, en ruido. El Quinto Programa de política y actuación medioambiental de la Unión Europea reconoce y dice que la contaminación acústica constituye uno de los principales problemas medioambientales en Europa. El ruido se ha convertido así, en una de las mayores fuentes de malestar de la vida actual. ⁽¹⁾

Debido a todo lo mencionado anteriormente, la ciencia conocida como acústica empieza a adquirir auge en los últimos tiempos. La acústica es la rama de la física que estudia el sonido, el cual se define como la variación de presión producida en un medio (sólido, líquido o gaseoso) por un elemento que vibra y que el oído humano puede detectar.

Tradicionalmente en acústica se ha caracterizado un sonido por su nivel de potencia sonora. La potencia acústica es la cantidad de energía por unidad de tiempo (potencia) emitida por una fuente determinada en forma de ondas sonoras y se expresa en vatios (w)

Según la siguiente imagen el nivel de potencia sonora de una fuente se mediría en un punto cercano a la fuente, aunque esto no permite caracterizar la potencia en su totalidad, ya que para ello habría que medir la presión en todas y cada una de las direcciones del espacio.

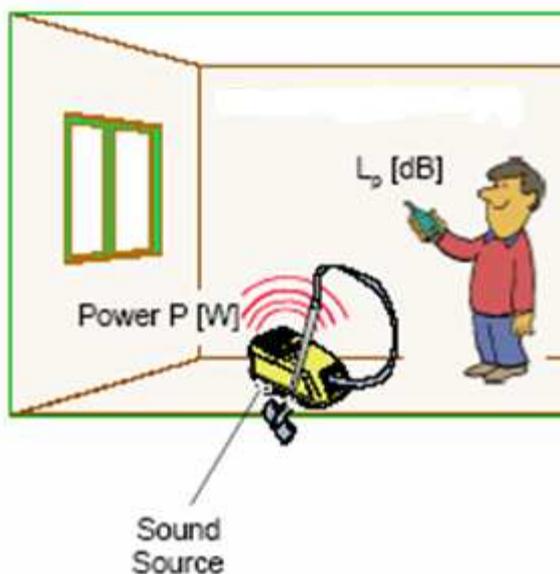


Imagen 1. Determinación de la potencia sonora ⁽²⁾

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

La potencia sonora (L_w) es una medida básica de la energía acústica de una fuente y no depende del entorno.

Una de las aplicaciones más importantes de la acústica es en el campo del aislamiento de edificios. Es lo que se refiere a disminuir el ruido proveniente del exterior y además, controlar las particiones internas. La norma española que se encarga de regular el aislamiento acústico en los edificios según niveles de potencia sonora es el DBHR.⁽²⁾

Otro parámetro característico de la disciplina de la acústica es la presión sonora. La presión sonora es una medida en un punto del espacio. Además de depender de la distancia a la fuente, esta medida puede variar debido a que la fuente generalmente no emite uniformemente en todas las direcciones. Es necesario conocer los índices de directividad para poder determinar las variaciones en las medidas de presión de puntos diferentes equidistantes de la fuente. La presión sonora también varía con las condiciones de apoyo de la fuente y también depende de las características acústicas de la sala.

Sin embargo, el parámetro de la presión sonora sólo nos da información de un valor escalar. ¿Qué ocurre si se desea conocer la dirección del sonido en un punto concreto del espacio? Bien, en dicho caso, se ha de atender a la intensidad sonora.

La intensidad acústica o intensidad sonora de una onda acústica se define como el valor medio de la energía que atraviesa un área unidad perpendicular a la dirección de propagación de la onda en la unidad de tiempo. (W/m^2)

La medición del sonido mediante intensidad se conoce como intensimetría acústica y está adquiriendo importancia dentro del campo de la acústica ya que posee claras ventajas en comparación con la medición de la potencia. Entre estas ventajas destaca que la intensidad es un valor vectorial que permite conocer no sólo el valor del sonido en un punto concreto del espacio sino también la dirección de éste. Además la medida es menos sensible al ruido de fondo, permite segmentar la fuente sonora pudiendo medirse los niveles sonoros de ciertas partes de la fuente, proporciona más información sobre perturbaciones del campo acústico y aísla el objeto a investigar. Sin embargo, cabe destacar algunos inconvenientes de la técnica cómo que se puede aumentar el tiempo de medida del ensayo y que los costes de instrumentación y formación son más altos.⁽³⁾⁽⁵⁾

Entre las aplicaciones más importantes de la intensimetría destacan:

- Determinación de la potencia sonora de una fuente

La medición *in situ* de la potencia sonora de maquinarias industriales es una de las principales aplicaciones de la intensimetría. La potencia sonora de una fuente puede determinarse integrando la intensidad sonora sobre una superficie que encierre a la fuente. Este método es válido incluso ante la presencia de otras fuentes sonoras en el exterior de esa superficie.

La intensimetría acústica hace posible la determinación de la potencia de fuentes de sonido sin el uso de costosas instalaciones especiales, tales como cámaras anecoicas y salas de reverberación.

- Identificación de fuentes de ruido

Mediciones de la intensidad sonora sobre superficies bidimensionales permiten localizar fuentes de ruido visualizando el campo sonoro. Esta técnica junto con modernas herramientas de gráficos por computadora, permiten profundizar los análisis de radiación y propagación del sonido y los efectos de interferencias y difracciones.

Para ello, se utilizan los llamados mapas de ruido como el que se muestra en la figura:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

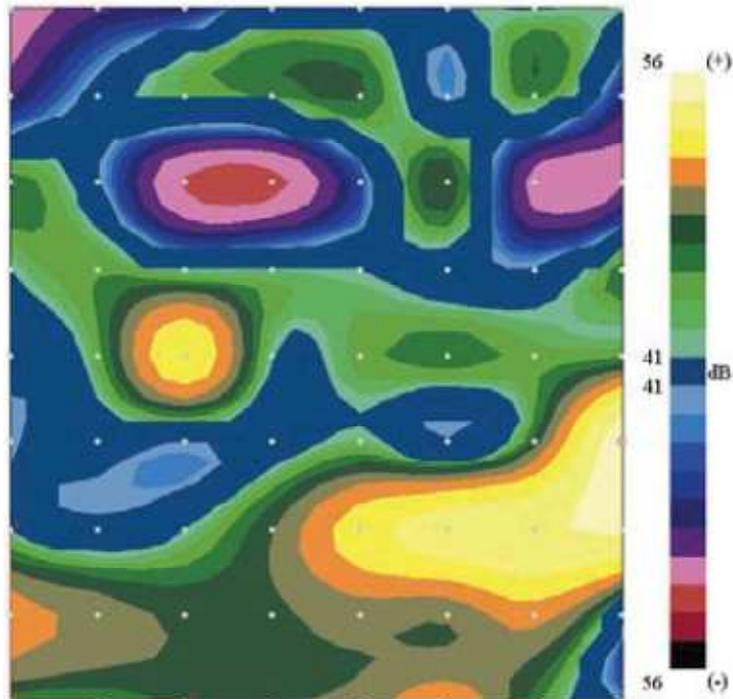


Figura 1. Mapa de ruido de una pared sometida a ensayo de intensimetría ⁽⁴⁾⁽⁶⁾

Según el esquema las zonas de mayor intensidad acústica de la pared son las de color rojo donde se encontraría situada la fuente de ruido.

- Aislamiento sonoro

Tradicionalmente el ensayo de aislamiento de una pared para calcular la pérdida de sonido (el índice de reducción R), que es la potencia incidente transmitida de forma logarítmica, se ha llevado a cabo mediante medición de potencia acústica. Lo cual requería la transmisión del sonido entre dos habitaciones aisladas reverberantes. La energía transmitida en la habitación sometida al ensayo se deduce de una estimación de la media espacial de los cuadrados de las presiones acústicas o suponiendo que el campo sonoro es difuso. La energía recibida en la habitación receptora se calcula de forma similar, siendo necesario además el tiempo de reverberación en esta habitación. Mediante intensimetría, puede medirse la energía directamente usando la sonda de medición. La suposición de que el campo es difuso no es necesario, sólo el tiempo de reverberación. La principal ventaja de este método es que permite medir las pérdidas de transmisión sonora en particiones individuales de un material. ⁽⁷⁾

El método de medición de la intensidad del sonido no está exento de problemas. Algunas personas consideran que el método muy difícil de usar, y no se puede negar que se requiere más conocimiento en medir la intensidad del sonido que, por ejemplo, utilizando un medidor de nivel de sonido ordinaria. Las dificultades son principalmente debido al hecho de que la exactitud de las mediciones de la intensidad de sonido con un sistema de medición dado depende en gran medida el campo de sonido en estudio. Otro problema es que la distribución de la intensidad del sonido en el campo cercano de una fuente de es mucho más complicada que la distribución de la presión acústica, lo que indica que los campos de sonido pueden ser mucho más complicados de lo que antes se pensaba. Los problemas se reflejan en la extensa literatura en apartados sobre los errores y limitaciones de la medición de la intensidad del sonido y en la bastante complicada normativa.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En el presente proyecto se llevarán a cabo varios ensayos de aislamiento en el laboratorio de ingeniería mecánica de la escuela técnica superior de ingeniería de la universidad de Sevilla. Se evaluarán los parámetros de aislamiento de los elementos según la norma ISO-15186-2 y la ISO 140-4. Se clasificará a su vez la superficie de medición según cómo cumpla los criterios descritos en dichas normas.

Se evaluarán, en los diferentes ensayos, parámetros como la densidad y la distancia de barrido, diferentes elementos de construcción, ruido de fondo, situación espacial de la fuente sonora...

Los ensayos de aislamiento se realizarán mediante intensimetría y mediante una medición de presión acústica para así, comprobar la efectividad de cada método para el mismo caso práctico y realizar un estudio comparativo evaluando los diferentes resultados y posibilidades que ofrece cada uno de los métodos.

1.3 MEMORIA JUSTIFICATIVA

El cálculo del aislamiento a partir de medidas de intensidad ofrece una serie de ventajas mencionadas con anterioridad, sobre el método clásico, que se vale de medidas de presión para el mismo. Entre ellas cabe citar, por ejemplo, la localización de fuentes de ruido, ya que gracias al carácter vectorial de la intensidad sonora podemos elaborar mapas de intensidad de ruido en nuestra superficie de medida.

La utilidad de las medidas de intensidad en el cálculo del aislamiento está más que demostrada, sin embargo falta información en cuanto a la influencia de varios parámetros como la distancia de medición o la forma de medición en el equipo de medida. Son muchos los errores, como se ha mencionado anteriormente que pueden perjudicar la medida de intensidad. De hecho en el presente proyecto, se han presentado muchas dificultades para obtener resultados fiables debido a las condiciones del entorno de medida que han afectado a los equipos de medida.

A pesar de ello, la técnica de intensimetría sigue siendo una de las más utilizadas en el campo de la ingeniería acústica para la medición del aislamiento sonoro tanto en laboratorio como "in situ". Ello es debido a que el método tradicional no proporciona un promedio espacial del aislamiento a lo largo de la partición, sino que da como único resultado un valor de aislamiento integrado a todo el cerramiento.

El principal objetivo del presente proyecto será la evaluación y comprobación de la efectividad del sistema de medición comparándolo con el método de presión así como la identificación de todos y cada uno de los posibles errores y/o problemas que hayan podido aparecer en la realización de los ensayos de aislamiento para el caso concreto.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

2. FUNDAMENTOS DE LA MEDIDA DE INTENSIDAD SONORA

2.1 INTRODUCCIÓN

Se procede en este capítulo, a contar detalladamente los fundamentos teóricos del campo teórico de la acústica referente a la intensimetría, es decir, a la medida de la intensidad del sonido.

Para ello, previamente se definirán los principales parámetros de la medida del sonido: la potencia, la presión y la intensidad. Tras ello, se ahondará en los principales conceptos básicos de la medición de intensidad acústica y como se han tenido en cuenta a la hora de la realización de los ensayos del proyecto.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PARAMÉTROS ACÚSTICOS

2.2.1 PRESIÓN ACÚSTICA

La presión sonora es el parámetro clásico de medición del sonido en acústica. Durante años se ha determinado si una fuente era más o menos ruidosa según su nivel de presión sonora. La presión sonora viene definida como la diferencia entre la presión instantánea debida al sonido (que es fluctuante) y la presión atmosférica estática. De tal forma que puede representarse por la siguiente expresión:

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{P_{RMS}}{P_{ref}} \text{ dB}$$

(Ecuación 1)

Donde:

P_{RMS} = Presión cuadrática media

P_{ref} = Presión de referencia = $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

El nivel de presión sonora se suele denominar como LPS (SPL en nomenclatura inglesa) además de la forma arriba reflejada. ⁽⁸⁾⁽⁹⁾

Es una magnitud escalar que depende, en exteriores, de la potencia de la fuente, su posición espacial y las condiciones físicas del medio. En interiores, además de esto, depende también, entre otras, de las condiciones del recinto.

Es importante resaltar este carácter escalar de la presión sonora, circunstancia ésta, que aunque proporciona mucha información sobre el riesgo de pérdida auditiva de los usuarios de máquinas, no aporta suficiente información respecto de las causas generadoras del ruido.

2.2.2 POTENCIA ACÚSTICA

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

La potencia sonora es la cantidad de energía por unidad de tiempo que radia una fuente sonora independientemente del entorno. La potencia sonora es un vector, dirigiéndose la radiación hacia las 3 direcciones espaciales (x, y, z) y viene expresada en vatios ($1\text{W} = 1\text{ J/s} = 1\text{ N}\cdot\text{m/s}$). Cualquier máquina tiene una potencia acústica inherente (causa de la existencia de un ruido).

La potencia acústica es la causa del ruido y la presión acústica es el efecto. La caracterización del nivel de ruido que emite una fuente se puede obtener calculando su potencia acústica. Existen dos procedimientos experimentales para determinar la potencia: mediante la medición de la presión o mediante la medición directa de la intensidad sonora. ⁽⁷⁾

2.2.3 INTENSIDAD ACÚSTICA

La intensidad sonora es el flujo de energía promediado en el tiempo por unidad de área, por lo que puede definirse como la potencia sonora por unidad de superficie. La intensidad sonora es un vector, aparte de tener una magnitud (módulo) se mide en un sentido de propagación (el sentido puede ser positivo o negativo)

Por lo tanto, la medida de este parámetro aporta información sobre la cantidad de energía que pasa a través de un área definida, y además, sobre la dirección y sentido en el que fluye la energía. Esta relación puede verse en la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo de energía} = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}} \Rightarrow W = \int_s \overline{I} ds$$

(Ecuación 2)

Si no existiera flujo de energía neto en un punto la intensidad sonora resultaría cero.

La intensidad sonora es un vector que describe la magnitud y dirección del flujo neto de energía acústica a través de una determinada superficie. Por lo tanto, las unidades son de energía por unidad de tiempo y superficie, es decir, W/m^2 .

Su definición depende del campo sonoro en el que se mida. Así pues:

- Campo libre:

$$I = \frac{P_{RMS}^2}{\rho \cdot c} = \frac{W}{S}$$

(Ecuación 3)

-Campo reverberante

$$I = \frac{P_{RMS}^2}{4 \cdot \rho \cdot c}$$

(Ecuación 4)

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Siendo, ρ la densidad del aire en kg/m^3 y c la velocidad del sonido en m/s . El producto de $\rho \cdot c$ representa la impedancia específica del medio donde se propaga el sonido; y su valor en el aire, dependiendo de las condiciones atmosféricas, es aproximadamente de $415 \text{ N}\cdot\text{s/m}^3$.⁽⁹⁾

En siguientes apartados se aclarará la diferencia entre campo libre y campo reverberante.

Frente a la medida de la presión sonora surge la medida de la intensidad sonora, que siendo un parámetro de carácter vectorial, aporta grandes ventajas en el análisis y control de los niveles de ruido de las distintas fuentes.

2.3 RELACIÓN ENTRE PRESIÓN, POTENCIA E INTENSIDAD SONORA

En la siguiente figura se muestra un caso particular de una fuente puntual, en el cual, puede observarse que la intensidad y la presión sonora disminuyen acorde aumenta la distancia existente entre el punto de medición y la posición de la fuente según la ley de cuadrados inverso. Sin embargo, la potencia sonora de la fuente es independiente de la distancia en la que se realice la medición, ya que si bien la intensidad sonora disminuye con el cuadrado de la distancia, la superficie aumenta en igual proporción.

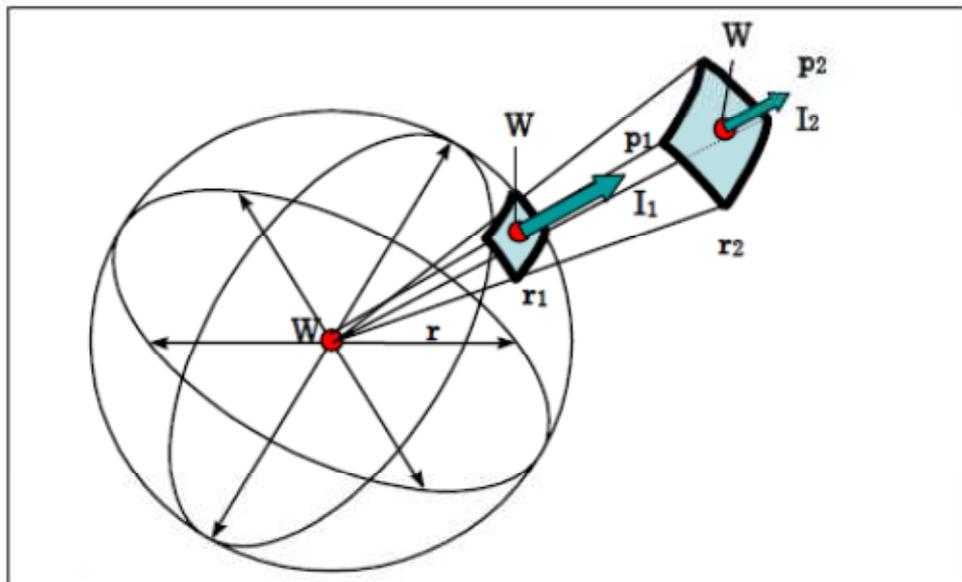


Figura 2. Relación entre presión, potencia e intensidad sonora⁽¹⁰⁾

En acústica, las medidas de presión, intensidad y potencia sonora se expresan en decibelios (dB). El decibelio se define como diez veces el logaritmo decimal del cociente de dos energías de la misma naturaleza y el denominador es una energía de referencia. Salvo que se diga lo contrario, la referencia se pone en el mínimo audible para que el cero corresponda con él. Para el caso de la presión sonora, el denominador de dicho cociente toma el valor de $p=20 \mu\text{P}$, el cual representa la mínima variación de presión sonora respecto de la presión atmosférica que el oído humano puede identificar.⁽⁹⁾ Por lo tanto:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

$$L_p = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{medida}}{20 \mu P} \right)^2$$

(Ecuación 5)

Las magnitudes de referencia de la intensidad y la potencia sonora se determinan, de manera aproximada, a partir del nivel de referencia de la presión sonora medida en condiciones de campo libre. Para esto se igualan los niveles de presión e intensidad sonora, es decir, que en condiciones de campo libre se obtendría el mismo valor en dB tanto para presión como para intensidad sonora. En cambio, cuando el campo sonoro presenta características reverberantes, el valor absoluto del nivel de intensidad sonora activa en dB será menor que el nivel de presión sonora.

Considerando la propagación de una onda sonora en el espacio, así como, dos puntos que cumplan la condición de estar situados uno de ellos al doble de distancia respecto de la fuente que el otro, las intensidades sonoras respectivas:

$$I_{r1} = \frac{W}{4\pi \cdot r_1^2} \qquad I_{r2} = \frac{W}{4\pi \cdot r_2^2}$$

(Ecuaciones 6 y 7)

Sustituyendo, $r_2 = 2 \cdot r_1$ se deduce que:

$$I_{r2} = \frac{W}{4\pi(2 \cdot r_1)^2} = \frac{W}{16\pi \cdot r_1^2} \Rightarrow I_{r1} = 4 \cdot I_{r2}$$

(Ecuación 8)

Por lo tanto, si se duplica la distancia entre dos puntos de medida con respecto a la fuente sonora, la intensidad se ve reducida a la cuarta parte, cumpliéndose la mencionada ley de cuadrados inversos.⁽¹¹⁾

2.4 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA INTENSIDAD SONORA

Según la definición de intensidad sonora dada con anterioridad, la ecuación para la intensidad en la dirección r vendría dada de la siguiente forma:

$$I_{r_{inst}} = \frac{dEr}{dt \cdot dA}$$

(Ecuación 9)

Donde, dEr es la energía que fluye a través del diferencial de área dA perpendicular a la dirección de propagación en el periodo de tiempo dt . La energía, como se ha mencionado anteriormente, puede fluir en ambos sentidos para una misma dirección, siendo la intensidad sonora neta la que resulte del balance de energías entrantes y salientes a través del área considerada.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Considerando que la energía resultante es igual a la fuerza resultante F_r multiplicada por el desplazamiento dr ; y la fuerza resultante es igual a la presión total p_t por diferencial de área dA , entonces:

$$dE_r = F_r \cdot dr = p_t \cdot dA \cdot dt$$

(Ecuación 10)

La presión total es la suma de la presión atmosférica (p_a) y de la variación que se produce respecto de ella (Δp_a); el término de presión atmosférica representa la componente continua de la presión total, mientras que el incremento de la presión respecto de la atmosférica representa la alterna, que puede ser producida por una onda sonora. Sustituyendo la ecuación 7 en la 6 nos quedaría:

$$I_{r_{inst}} = \frac{dE_r}{dt \cdot dA} = \frac{p_t \cdot dA \cdot dr}{dt \cdot dA} = p_t \cdot \frac{dr}{dt} = p_a \cdot u_r + \Delta p_a \cdot u_r$$

(Ecuación 11)

Considerando que u_r representa la velocidad de las partículas del aire, y llamando simplemente p , al incremento de presión respecto de la presión atmosférica Δp_a , queda:

$$I_{r_{inst}} = p_a \cdot u_r + p \cdot u_r$$

(Ecuación 12)

La componente continua de la intensidad instantánea tiene un valor promedio cero, ya que no aporta flujo neto de energía. El otro término es igual al producto de la presión sonora instantánea y la correspondiente velocidad de las partículas en la dirección r . Es decir, en un campo sonoro donde existe un flujo neto de energía, el vector intensidad es igual al resultado de multiplicar la presión sonora por la velocidad instantánea de las partículas del medio, promediado en el tiempo, en una misma posición de medida y en una dirección r determinada. De tal forma que nos quedaría:

$$I_r = \overline{p(t) \cdot u_r(t)}$$

(Ecuación 13)

Para un campo sonoro sinusoidal en donde se da que:

$$p(t) = p_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_1)$$

$$u(t) = u_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_2)$$

(Ecuaciones 14 y 15)

Sustituyendo estas ecuaciones en la ecuación 13 y resolviendo la integral quedaría lo siguiente:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

$$\bar{I} = \frac{1}{2} p_0 \vec{u}_0 \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2) = p_{RMS} \vec{u}_{RMS} \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

$$\bar{I} = p_{RMS} \vec{u}_{RMS} \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

(Ecuaciones 14 y 15)

El factor $\frac{1}{2}$ representa el promedio de la presión y la velocidad instantánea de las partículas. El factor es eliminado de la ecuación al determinarse los valores eficaces (RMS) de las señales en el proceso de medición.

Analizando la expresión (15), se puede concluir que la intensidad sonora no solo depende de la presión y la velocidad de las partículas, sino que también depende del desfase de ambas señales. Para poder determinar la intensidad sonora es necesario un equipo de medida muy preciso en la determinación de la fase de dichas señales. ⁽¹¹⁾

2.5 CAMPOS ACTIVOS Y REACTIVOS

Un campo sonoro es una región del espacio donde se propaga el sonido. Se considera que un campo sonoro es libre cuando no existen reflexiones de sonido que puedan concurrir en un punto. Por el contrario, se considera que el campo sonoro es difuso o reverberante, cuando el sonido se refleja tantas veces como se emite en todas las direcciones con la misma probabilidad. La propagación del sonido implica un flujo neto de energía, luego es necesario que se den en menor o mayor grado las condiciones de campo libre. El campo sonoro define las condiciones en las que tiene lugar la variación de la presión sonora en el espacio. Se considera que un campo sonoro es activo, cuando existe flujo de energía neto a través de una superficie. Por el contrario, se dice que un campo sonoro es reactivo puro, cuando no existe flujo de energía neto a través de dicha superficie. En este último caso, la energía fluye en un sentido atravesando la superficie definida, regresando posteriormente en sentido contrario. O también podría darse el caso, que la intensidad fuera paralela a la superficie, en cuyo caso el flujo de energía también sería cero. La energía se comporta en el campo sonoro de forma similar a como lo hace un resorte. Siendo, por lo tanto, la intensidad sonora nula.

En un campo sonoro libre ideal predomina de forma pura la componente activa, mientras que en un campo sonoro muy reverberante, la componente que domina es la reactiva.

Cuando la presión y la velocidad de las partículas están en fase, se dice que el campo es activo; en este caso se presentan las condiciones de campo libre y el producto de p y u da un valor definido. Entonces existe un flujo neto de energía. Según la ecuación 16:

$$\phi_1 = \phi_2$$

Y por tanto:

$$\vec{I}_r = p_{RMS} \vec{u}_{RMS} \cdot \cos(0^0) = \frac{p_{RMS}^2}{\rho \cdot c}$$

(Ecuación 17)

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Por el contrario, si la presión sonora y la velocidad de las partículas están desfasadas 90° entre sí, el campo se denomina reactivo. El producto de p y u varía sinusoidalmente alrededor de cero por lo que su valor promedio es nulo; de la expresión anterior:

$$\overline{I_r} = p_{RMS} \cdot \overline{u_{RMS}} \cdot \cos(90^\circ) = 0$$

(Ecuación 18)

En general los campos sonoros tienen ambas componentes: la activa y la reactiva. Es decir, habrá una parte de energía que fluya en una o más direcciones a través del espacio; y otra parte de la energía sonora, que entre y salga en esa zona del espacio donde existe el campo sonoro.

Como la velocidad de las partículas es una magnitud vectorial, puede descomponerse en dos componentes, una componente activa en fase con la presión sonora y otra reactiva desfasada 90° con la misma. Sólo la componente activa de la velocidad de las partículas multiplicada por la presión sonora dará un resultado no nulo. Por ello:

$$\overline{I} = \overline{I_{ac}} + j\overline{I_{re}} = \overline{I_{ac}}$$

(Ecuación 19)

Casi siempre que se efectúan mediciones de intensidad, lo que interesa es su componente activa, ya que es esta la que nos informa a cerca del flujo neto de energía. ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

3. TEORÍA DE LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD SONORA

Cuando una partícula de aire se desplaza desde su posición media se produce un incremento temporal de la presión. El incremento de dicha presión produce un empuje que se transmite de la partícula más próxima a la siguiente partícula y, por el efecto del choque entre partículas, un empuje en sentido contrario sobre la primera partícula que la desplaza hacia su posición de reposo. El ciclo de incremento de presión al aproximarse las partículas y el enrarecimiento del aire cuando se separan, se propaga a través del medio como una onda sonora. Hay por lo tanto, dos parámetros importantes en este proceso: la presión sonora que aumenta y disminuyen con respecto a la presión atmosférica y la velocidad de las partículas del aire que oscilan en una zona del espacio concreta.

Para medir la intensidad sonora es necesario conocer la presión sonora instantánea y la correspondiente velocidad de las partículas. La presión se puede medir fácilmente. Sin embargo, medir directamente la velocidad de las partículas del aire resulta más complejo y requiere transductores especiales, que por suerte cada vez están más accesibles. Pero también se puede aplicar un método alternativo consistente en medir la presión sonora con dos micrófonos separados una distancia prefijada. Este método alternativo resulta muy fácil de aplicar si se utiliza un analizador con al menos dos canales.

Por lo tanto, se puede considerar que existen dos tecnologías claramente definidas para la medida de la intensidad sonora. La primera basada en la medida de la presión sonora y la velocidad de las partículas con una sonda del tipo p-u. La segunda basada en la medida del gradiente de presión sonora en dos puntos muy próximos mediante dos micrófonos con una sonda del tipo p-p.⁽¹¹⁾

3.1 SONDAS DEL TIPO p-p

Este método está basado en la segunda ley de Newton que es la ecuación fundamental de la dinámica, donde la fuerza resultante ejercida sobre un cuerpo de masa m , le transmite una aceleración inversamente proporcional a la masa de dicho cuerpo, $a = F/m$. La relación de Euler (ecuación 18) está basada en la expresión anterior, pero aplicada a un fluido de densidad ρ . Según esta ecuación, es el gradiente de presión quien acelera al fluido en una determinada dirección r . Conociendo el gradiente de presión y la densidad del fluido, puede calcularse la aceleración. Integrando la aceleración, obtenemos la velocidad de las partículas del medio:

$$-\text{grad}p = -\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial r} = -\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

(Ecuación 20)

Como el gradiente de presión es proporcional a la aceleración de las partículas, la velocidad de éstas se puede obtener integrando el gradiente de presión en la dirección r respecto del tiempo (Ecuación 21)

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

$$u_r = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt$$

(Ecuación 21)

En la práctica, el gradiente de presión puede ser aproximado mediante la medida de la presión en dos puntos, p_A y p_B , separados por un espaciador fijo. Si se divide la diferencia de presiones $p_A - p_B$, por la distancia que separa ambos micrófonos Δr , se obtiene una buena aproximación de la velocidad media de las partículas en la dirección r . La expresión (Ecuación 22) representa un estimador fiable que relaciona los parámetros mencionados anteriormente. ⁽¹¹⁾

$$\vec{u}_r = -\frac{1}{\rho \cdot \Delta r} \int (p_B - p_A) \cdot dt$$

(Ecuación 22)

Desde el punto de vista práctico, la sonda de intensidad sonora está formada por dos micrófonos separados por un espaciador. Midiendo ambas presiones, se obtiene el gradiente de presión a lo largo de la línea imaginaria que une el centro de ambos micrófonos; así mismo, la estimación de la velocidad de las partículas del aire se realiza en la posición central de esta línea, es decir, en el punto equidistante entre los micrófonos, figura 3:

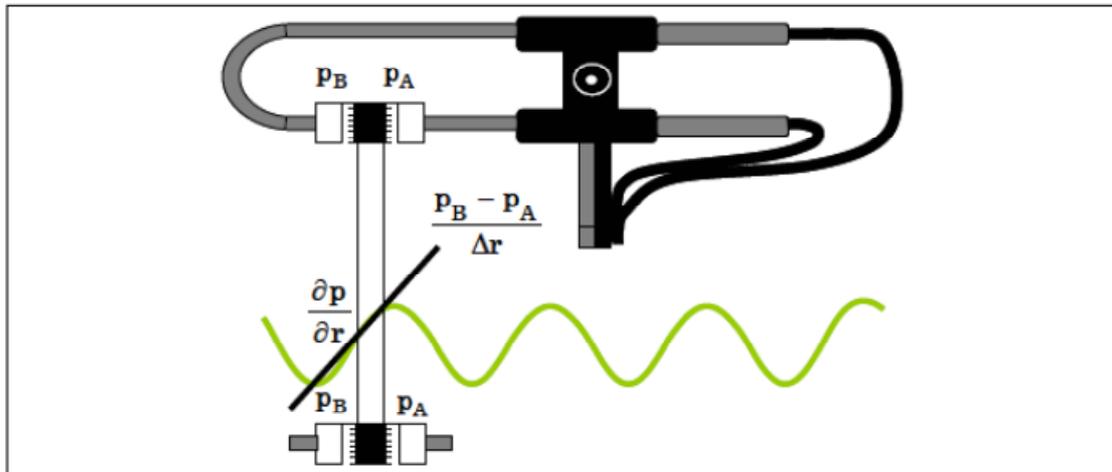


Figura 3. Determinación del gradiente de presiones con una sonda tipo p-p ⁽¹¹⁾

3.2 PROCESADO DE LA SEÑAL CON UNA SONDA DEL TIPO p-p

Un sistema analizador de intensidad sonora del tipo p-p consta de una sonda y un analizador. La sonda mide simultáneamente la presión sonora con dos micrófonos. El analizador realiza la integración y los cálculos necesarios para obtener la intensidad sonora. Estas ecuaciones no son nuevas. Lo que es nuevo es el uso de las modernas técnicas de procesamiento de señal para obtener la intensidad sonora. Ésta puede obtenerse de dos formas: mediante uso directo de integradores y filtros analógicos o digitales, para llevar a cabo la resolución de la ecuación, o mediante el uso de un

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

anizador FFT. Este último relaciona la intensidad con la parte imaginaria del espectro cruzado de las dos señales de los micrófonos. Las dos formas son equivalentes y con ambas se obtiene la intensidad sonora con aceptable fiabilidad.

3.2.1 MÉTODO DIRECTO

Los equipos que utilizan el método directo suelen ser portátiles, procesando la señal por medio de hardware específico que realiza los cálculos necesarios siguiendo la ecuación (22). La componente del vector de la intensidad sonora en la dirección r se calcula por medio de dicha expresión.

$$\overline{I_r} = \overline{p \cdot u_r} = -\frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \Delta r} \overline{(p_A + p_B) \cdot \int (p_B - p_A) \cdot dt}$$

(Ecuación 23)

Donde la presión sonora es considerada como el valor medio entre las dos presiones medidas por los micrófonos. La velocidad de las partículas se calcula según la ecuación 22, vista con anterioridad.

En la figura 3 se muestra un diagrama de bloques de un medidor de intensidad sonora en tiempo real, incluido el filtrado digital en tercios de octava. Se puede observar que el diagrama de bloques sigue la ecuación paso a paso. En primer lugar la señal es captada por los micrófonos, preamplificada y filtrada. En segundo lugar se obtiene la presión media medida para ambos micrófonos por una parte y, por la otra, el gradiente de presión definido para ambas señales en el espacio. Finalmente, el producto de los valores obtenidos entre sí y su promediado posterior, determina el valor de la intensidad sonora. El método directo es muy útil para el desarrollo de equipos portátiles de medida. ⁽¹¹⁾

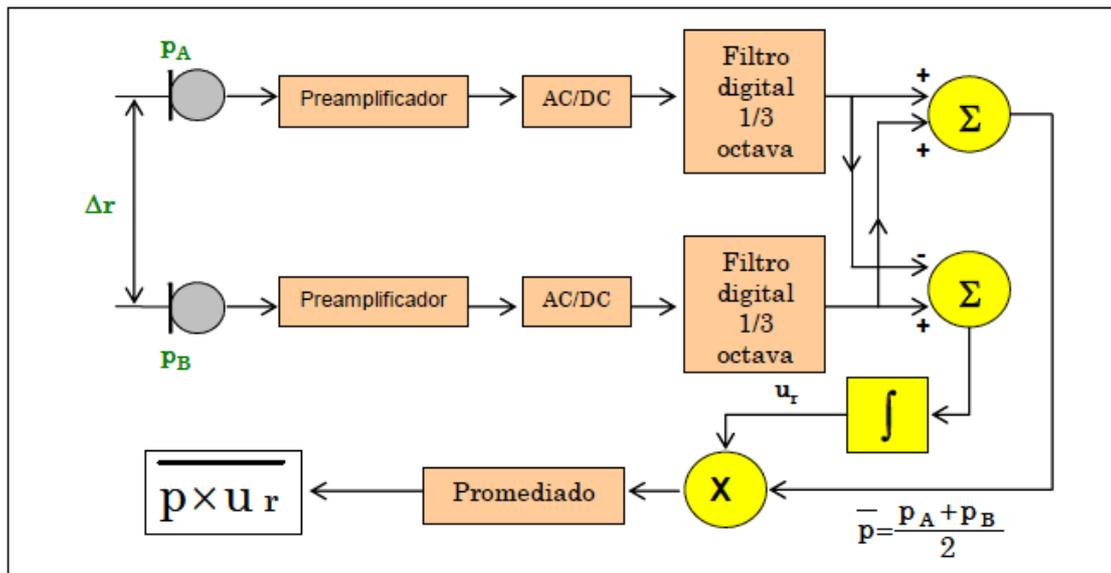


Figura 4. Esquema de bloque de un analizador que utiliza el método directo ⁽¹¹⁾

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

3.3. ERRORES EN MEDICIONES CON SONDAS p-p

Existen varias fuentes de error en la medición de la intensidad sonora. Algunos de ellos ligados al método en sí mismo y otros a deficiencias técnicas en las mediciones.

Las causas de error más importantes son: el error debido a la aproximación por diferencias finitas del gradiente de presión entre micrófonos y el error originado por la instrumentación debido al desajuste de la medida de la fase entre canales. Otra serie de errores son considerados de menor importancia por estar relacionados con aspectos aleatorios, ambientales o debidos a la falta de pericia en el manejo de la sonda.

3.3.1 ERROR POR APROXIMACIÓN DE FUENTES FINITAS

Las sondas de intensidad del tipo p-p, calculan la velocidad de las partículas determinando el gradiente de presiones entre los dos micrófonos, estando éstos separados una distancia conocida. La distancia de separación de los micros limita el rango de frecuencia de medida. Para una distancia determinada Δr , habrá un límite en alta frecuencias donde al disminuir la longitud de onda considerablemente se produzca un error significativo en la aproximación por diferencias finitas del gradiente de presión. ⁽⁷⁾

Para una separación efectiva de los micros, habrá un límite en alta frecuencia por encima del cual los errores se incrementarán significativamente. En la práctica se suelen considerar los siguientes límites superiores en frecuencia para las diferentes distancias estándar de separación de los micrófonos:

Longitud del espaciador [mm]	Límite superior de frecuencia [kHz]
50	1,25
12	5
6	10

Tabla 1. Límite de alta frecuencia según el espaciador. ⁽⁷⁾

En la siguiente figura puede observarse este error a altas frecuencias:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

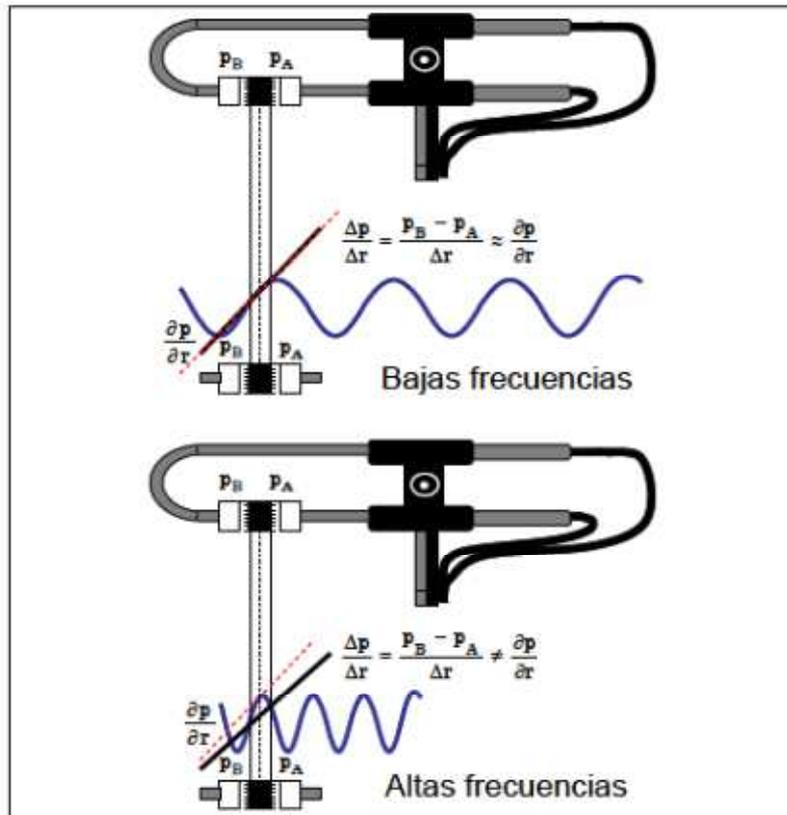
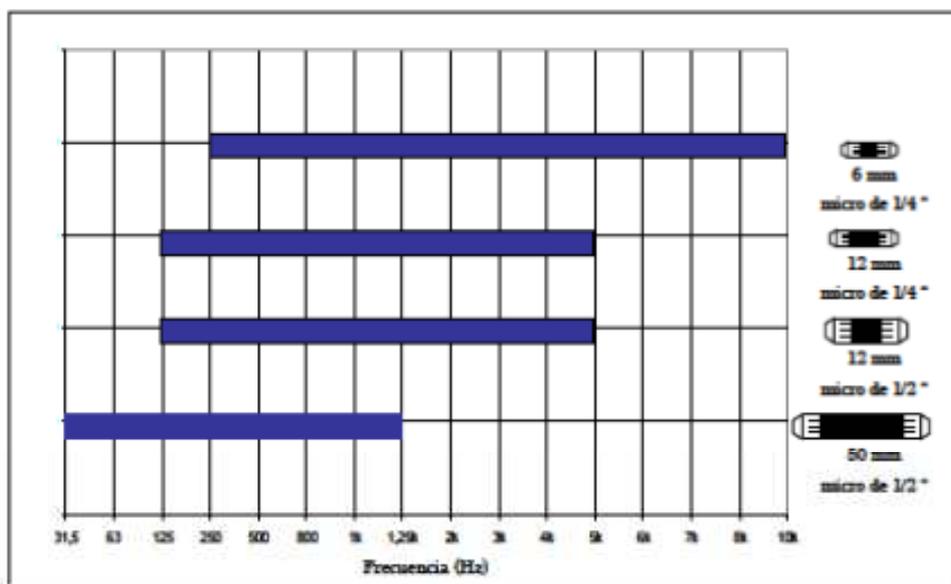


Figura 5. Medida del gradiente de presión a alta y baja frecuencia. ⁽¹¹⁾

A baja frecuencia la aproximación por diferencias finitas es correcta, y a alta frecuencia el error es considerable.

En la práctica los separadores se pueden fabricar en función del ancho de banda que interese y para una aplicación concreta. La siguiente figura muestra los separadores a utilizar según la frecuencia de trabajo:



Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Figura 6. Limitaciones en frecuencias para distintos separadores. ⁽⁷⁾

Las medidas a baja frecuencia deben realizarse con el separador de 50 mm, mientras que a alta frecuencia el ideal es el de 6 mm. ⁽⁵⁾

3.3.2 ERROR DEBIDO AL DESFASAJE ENTRE LOS CANALES

Las diferencias de fase entre las mediciones de ambos micrófonos son la fuente de error más importante en la medición de intensidad sonora, aun con los mejores equipamientos disponibles en la actualidad. Aunque los equipos actuales han evolucionado mucho y están en mejora continua, todos tienen algún desfase entre los canales que se suma al ángulo detectado por los micrófonos; a bajas frecuencias la diferencia de fase en el campo sonoro entre ambos micrófonos es extremadamente pequeña y la más mínima diferencia de fase introducida por el equipo puede generar grandes errores en la estimación de la Intensidad Sonora.

El equipo mide un ángulo que es la suma entre el desfase del campo sonoro, \emptyset , y el desfase introducido por la cadena de medición, φ .

$$\Phi = \emptyset + \varphi$$

(Ecuación 24)

Como se puede ver cuanto mayor es \emptyset , menor será el error relativo de la medición; por ello a bajas frecuencias donde \emptyset y φ pueden llegar a ser del mismo orden, el error introducido por el equipo puede llegar a ser considerable.

Por otra parte, estos límites no dependen exclusivamente del aparato sino que además son función del campo acústico bajo estudio.

Cuando el campo sonoro posee una componente reactiva considerable, el nivel de presión sonora es mayor que el nivel de intensidad sonora. La diferencia entre ambos niveles es el índice que mide la reactividad del campo, siempre y cuando se mantenga una correcta orientación de la sonda de intensidad. Esta circunstancia modifica la diferencia de fase que puede medirse en el campo sonoro. ^{(7) (11)}

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

4. TEORÍA DEL AISLAMIENTO

El aislamiento o índice de reducción sonora R , se define como “diez veces el logaritmo del cociente entre la potencia sonora que incide sobre el objeto de prueba que se considere, W_1 , y la potencia sonora transmitida a través de este, W_2 ”

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2}$$

(Ecuación 25)

El cálculo de este índice según las normas de intensidad y presión se abordará en los siguientes apartados detalladamente. Es importante señalar sin embargo, que, en la práctica, a la hora de asignar un valor de aislamiento a un determinado material constructivo, se recurre a los valores obtenidos en cámaras de ensayo y no a las expresiones teóricas. ⁽¹³⁾

4.1 AISLAMIENTO DE UNA PARED SIMPLE HOMOGÉNEA: LEY DE MASAS

Se explicará a continuación el caso ideal más simple: una partición constituida por un único material. Obviamente, existen numerosos casos de mayor complejidad con paredes dobles, pero al no someterse a ensayo en el presente proyecto, no se han tratado en este apartado.

Dado un cerramiento formado por un único material de unas características de elasticidad y densidad conocidas, la energía “atravesará” el cerramiento tanto a través de los poros como en forma de una nueva onda generada al vibrar la propia partición.

La atenuación de la onda sonora incidente depende de la frecuencia del sonido, de la masa de la pared y de las condiciones de contorno de la partición. En el caso de una pared simple, las propiedades aislantes varían considerablemente con la frecuencia, por lo que se suelen distinguir tres zonas de comportamiento claramente diferenciado:

Zona 1: A bajas frecuencias, la pared se comporta como un muelle o placa vibrante. En esta zona, el aislamiento decae con la frecuencia y se ve afectado así mismo por las frecuencias propias o de resonancia, que están relacionadas con la rigidez y las condiciones de contorno de la pared. La existencia de estas frecuencias de resonancia disminuye drásticamente el aislamiento por debajo de los 100 Hz.

Zona 2: Se corresponde con la mayor parte del espectro de interés para los materiales de uso habitual en las construcciones arquitectónicas. En este rango de frecuencias el comportamiento de la pared simple está gobernado por su masa y se la puede considerar como una gran cantidad de pequeñas masas deslizándose unas sobre otras. ^{(13) (15)} Para este rango de frecuencias se encuentran expresiones teóricas para el aislamiento en función de la masa y de la frecuencia, de la forma:

$$R = 20 \log(Mf) + C$$

(Ecuación 26)

Donde M es la masa por unidad de superficie del material, f la frecuencia (Hz) y C una constante que depende de la impedancia del material. El aislamiento R aumenta con una pendiente de 6 dB/octava, tanto si se duplica la masa del cerramiento como si se dobla la frecuencia, aunque esto es así sólo hasta un determinado límite superior de frecuencias. La ecuación (26) constituye la conocida *Ley de Masas* y se representa en la siguiente figura:

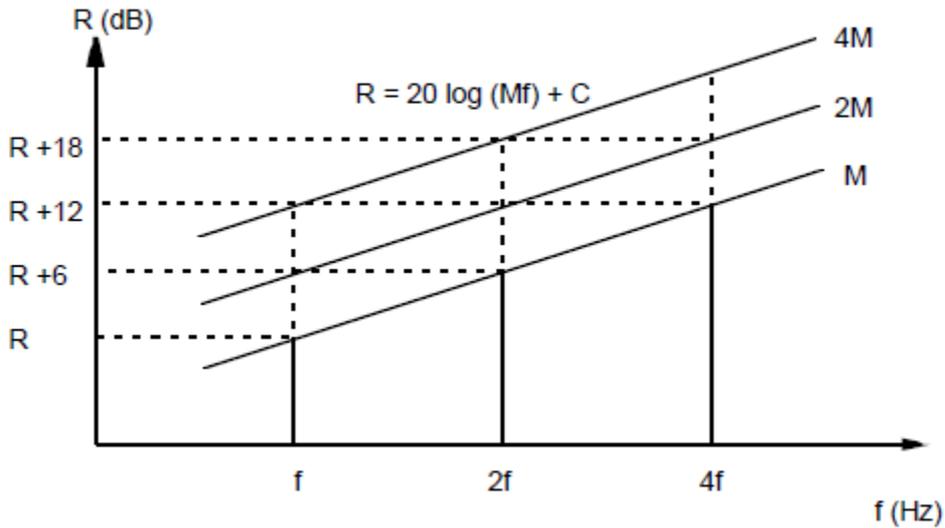


Figura 7. Ley de masas. Partición simple ⁽¹³⁾

En la práctica, los materiales no responden a la ley de masas a todas las frecuencias. Bajo determinadas condiciones, las ondas de flexión (λ_F) que se generan en la pared al vibrar, pueden entrar en resonancia con la onda sonora incidente (λ). A este fenómeno se le denomina coincidencia. (Figura 8)

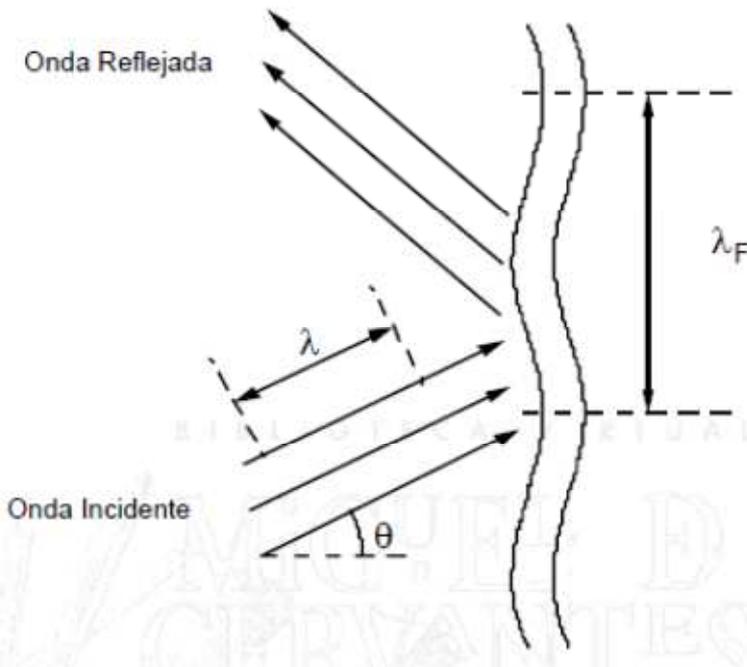


Figura 8. Onda sonora de flexión. Fenómeno de coincidencia ⁽¹³⁾

La menor de las frecuencias de coincidencia posibles es la llamada frecuencia crítica y marca el límite superior a la zona 2. Debido al fenómeno de resonancia, el aislamiento se reduce bruscamente a esta frecuencia. Para los sonidos incidentes cuya longitud de onda cumpla la relación:

$$\lambda = \lambda_F \cdot \text{sen} \theta$$

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

(Ecuación 27)

Donde λF es la longitud de la onda a flexión originada en la partición y θ el ángulo de incidencia, se producirá la resonancia. La frecuencia crítica viene dada por:

$$f_c = \frac{6,14 \cdot 10^4}{d} \sqrt{\frac{\rho(1 - \sigma^2)}{E}}$$

(Ecuación 28)

Siendo d es el espesor del cerramiento, ρ es la densidad del material del cerramiento, σ su coeficiente de Poisson, E su módulo de Young y λ la longitud de la onda incidente.

Zona 3: Por encima de la frecuencia crítica, la pared simple no obedece a la ley de masas, pasando nuevamente a tener un comportamiento de resorte. En esta zona, el factor que gobierna las variaciones del aislamiento es el amortiguamiento interno del material, es decir, la capacidad del material para absorber energía acústica a las ondas de flexión. Existen sucesivas frecuencias de coincidencia muy distanciadas. Para frecuencias mayores a la frecuencia crítica, a igualdad de masa y frecuencia, el coeficiente de aislamiento aumenta entre 8 y 10 dB cada vez que el amortiguamiento se haga diez veces superior. Cuando se doble la frecuencia, a igualdad de masa y amortiguamiento, para frecuencias superiores a la crítica, R se incrementará entre 9 y 10 dB. ^{(13) (15)}

Las tres zonas anteriormente descritas pueden observarse en la figura:

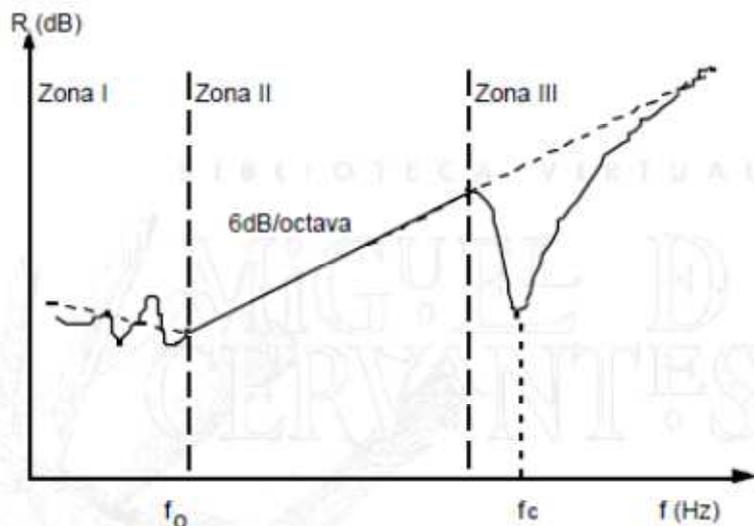


Figura 9. Zonas de aislamiento de una pared simple ⁽¹³⁾

4.2 NORMATIVA ISO-140-4. MEDICIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO EN LOS EDIFICIOS Y DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN. MEDICIONES IN SITU DEL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO ENTRE LOCALES.

En esta norma se especifica un método de laboratorio para la medición del aislamiento acústico de elementos constructivos tales como paredes, suelos, ventanas, puertas, elementos de fachada y fachadas, excepto aquellos clasificados como elementos constructivos pequeños. El laboratorio en el que se realizan los ensayos se debe ajustar a lo especificado en la parte 1 de esta misma serie de normas. Los resultados se expresan en intervalos de frecuencia de tercios de octava.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

4.2.1 ECUACIONES Y CONDICIONES DE CAMPO

Para poder determinar el aislamiento de un determinado elemento constructivo en laboratorio, es preciso estimar la potencia sonora que incide sobre él en la sala emisora W_1 y la potencia sonora transmitida a la sala receptora por dicho elemento W_2 . La norma exige que el campo sonoro creado, tanto en la sala emisora como en la receptora, sea difuso y que el sonido radiado en el recinto receptor se transmita sólo a través de la muestra. En estas condiciones de campo difuso se conoce la relación existente entre intensidad y presión sonora promedio en una banda de frecuencia:

$$I_1 = \frac{p_1^2}{4 \cdot \rho_0 \cdot c}$$

(Ecuación 29)

Donde $\rho_0 c$ es la impedancia del medio, producto de la densidad por la velocidad del sonido, en este caso en aire y p_1 es la presión sonora.

En la sala emisora, por tanto, la potencia sonora que incide sobre la muestra será:

$$W_1 = I_1 \cdot S_p = \frac{p_1^2}{4 \cdot \rho_0 \cdot c} \cdot S_p$$

(Ecuación 30)

Siendo S_p la superficie del elemento de prueba. En la sala receptora, sin embargo, para estimar la potencia sonora recibida sólo a través de la muestra, es preciso tener en cuenta la absorción del resto de la sala, ya que el nivel de intensidad estimado al medir la presión sonora no coincidirá exactamente con el inyectado, al haber sido absorbida por las paredes parte de la energía acústica. En este caso se cumplirá:

$$W_2 = I_2 \cdot A_2 = \frac{p_2^2}{4 \cdot \rho_0 \cdot c} \cdot A_2$$

(Ecuación 31)

Donde A es el área de absorción equivalente de la sala receptora en dicha banda de frecuencia.

La energía que es absorbida por las paredes sumada a la que llega a la sala receptora debe ser igual a la transmitida por la fuente sonora en la sala emisora, alcanzándose pues, un equilibrio en la superficie de medición.

El aislamiento, índice de reducción sonora o índice de pérdidas por transmisión sonora, R , según la ecuación 25, en cada banda de frecuencias, será:

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} = L_{p_2} - L_{p_1} + 10 \log \frac{S_p}{A_2}$$

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

(Ecuación 32)

Donde L_{p1} y L_{p2} serían los niveles de presión sonora en las habitaciones 1 y 2 respectivamente.

Y el aislamiento bruto (D) vendría dado por la ecuación:

$$D = L_{p1} - L_{p2}$$

(Ecuación 33)

Es importante hacer constar en este apartado, que el área de absorción equivalente se calcula a partir de la medida del tiempo de reverberación en la sala receptora que, en condiciones de laboratorio, debe ser una cámara reverberante. ^{(23) (25)}

4.3 NORMATIVA ISO 15186-2: MEDICIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO EN LOS EDIFICIOS Y DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN UTILIZANDO INTENSIDAD SONORA.

Esta norma establece de forma similar a lo expresado en la norma anterior, pero con medidas de intensidad acústica. Al igual que en la normativa anteriormente expuesta, los resultados se presentan en tercios de octava.

4.3.1 ECUACIONES Y CONDICIONES DE CAMPO

Con carácter general, la diferencia sustancial entre la metodología propuesta por la normativa existente (también llamada “tradicional” o “método por presión”) y la que a continuación se presenta o “método de intensidad”, radica en que la estimación de la potencia sonora en la sala receptora en este último caso se realiza mediante una medida directa de la intensidad sonora inyectada por el elemento de prueba en la sala receptora.

En el método de presión, la evaluación de la potencia sonora inyectada se realiza a través de la presión, lo cual implica la utilización de una relación aproximada entre presión e intensidad, válida sólo en campo difuso. Sin embargo, en el método de intensidad, la relación entre la potencia sonora inyectada y la intensidad es directa, por lo que en principio es válida en todas circunstancias. En este caso se tiene:

$$W_2 = I_2 \cdot S_m$$

(Ecuación 34)

Donde I_2 es el promedio espacial y temporal de la intensidad sonora medida en la sala receptora en la dirección perpendicular a la superficie de prueba S_p y midiendo sobre una superficie, que la recubra totalmente, S_m , paralela y perpendicular a ella. Se considerará el sentido del vector intensidad sonora positivo cuando el flujo de energía se produzca desde el cerramiento al interior de la sala receptora. Suponiendo el campo difuso en la sala emisora, el aislamiento R, viene dado por:

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} = L_{p1} - L_{I2} + 10 \log \frac{S_p}{S_m} - 6$$

(Ecuación 35)

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Donde L_{12} sería el nivel de intensidad sonora en la habitación 2.

La ecuación 34 no se aplica a la potencia incidente, puesto que al tomar como positivo el sentido de la intensidad desde la sala emisora a la receptora, el término de la potencia resultaría negativo.

La norma propone “corregir” este valor de aislamiento con la corrección de Waterhouse K_c , (cuyo significado se presenta en el apartado siguiente) ya sea mediante unos valores a cada frecuencia predeterminados y dados en un anexo del borrador de norma (calculados para salas de dimensiones 4.5 x 6.0 x 3.0 m³, que pretenden representar unas dimensiones de compromiso para las salas existentes), o bien de acuerdo a la ecuación de Waterhouse que se verá más adelante. Es interesante señalar que estas “correcciones” sólo se proponen cuando el fin de las medidas es el de comparar los resultados obtenidos por intensidad con los de presión, ya que, como se explica posteriormente, no son verdaderas correcciones al método de intensidad. En este caso, la expresión del aislamiento resulta:

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} = L_{p1} - L_{I2} + 10 \log \frac{S_p}{S_m} - 6 + K_c$$

(Ecuación 36)

Asociado a las medidas, se define el índice de presión-intensidad superficial, denotado F_2 , ΔpI o F_{pI} según la bibliografía consultada, como la diferencia entre el nivel de presión y el nivel de intensidad normal a la superficie, siendo ambos niveles promediados tanto temporal como espacialmente:

$$F_{pI} = L_p - L_{In}$$

(Ecuación 37)

Por analogía con el índice anterior, y en relación con el proceso de calibración, se define el índice de presión-intensidad residual, denotado como δ_{pI0} . En este caso, el indicador se corresponde con la diferencia entre el nivel de presión y el nivel de intensidad medido cuando se sitúa la sonda en un campo tal que la intensidad sonora sea nula (incidencia normal al eje de la sonda):

$$\delta_{pI0} = L_{p0} - L_{I0}$$

(Ecuación 38)

En el siguiente apartado se explicará el uso de este parámetro, ya que en la realidad se toman valores tabulados.

Una de las grandes aportaciones de la técnica de intensidad incluida en el borrador de norma es la posibilidad de calcular un valor de aislamiento parcial asociado a cada uno de los elementos que constituyen un cerramiento en conjunto, posibilidad que no existía con el método tradicional. Para ello se subdivide el elemento de prueba en N superficies de medida menores, tantas como se estime de interés, $S_{m,i}$. El nivel de intensidad medio inyectado en la sala receptora vendrá dado por:

$$L_{In} = 10 \log \left[\frac{1}{S_m} \sum_i^N S_{m,i} 10^{0,1L_{mi}} \right]$$

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

(Ecuación 39)

Donde el subíndice i se refiere a cada una de las superficies menores y la superficie de medida total S_m es la suma de todas ellas.

$$S_m = \sum_{i=1}^N S_{m,i}$$

(Ecuación 40)

S_p y S_m podrían llegar a ser iguales en el caso de que se sometiera a ensayo toda la superficie de medición, ya que S_p corresponde a la superficie de la pared al completo y S_m corresponde a la superficie de la pared en la que se mide la intensidad transmitida. Sin embargo, para el caso concreto de nuestros ensayos, sólo se midió la intensidad en una parte de la pared.⁽²¹⁾

4.3.2. AISLAMIENTO A BAJAS FRECUENCIAS. LA CORRECCIÓN DE WATERHOUSE

Uno de los temas que en la actualidad está adquiriendo gran importancia es el aislamiento a bajas frecuencias ya que, en los últimos años, han aumentado vertiginosamente las fuentes de ruido potentes por debajo de los 200 Hz. Tanto el ruido de tráfico, como los diversos equipos utilizados para la comodidad en la vivienda y en las actividades industriales y comerciales son una continua fuente de ruido a bajas frecuencias. Sin embargo, es precisamente en este rango de frecuencias cuando las hipótesis en las que se basa la normativa vigente dejan de cumplirse. Si las dimensiones de las salas son del orden de la longitud de onda de interés, el campo deja de ser difuso y, por tanto, la relación entre potencia y presión sonora anteriormente establecida deja de tener validez. Se ha demostrado, tanto experimentalmente como a través de modelos teóricos, que el aislamiento a bajas frecuencias no es una característica propia de la partición, sino más bien del sistema sala-partición-sala, y una misma partición presentará distintos valores de aislamiento a bajas frecuencias en función de las características de las salas que separa. A modo de regla de oro se ha establecido que debe existir una diferencia en longitud entre ambas salas de, al menos, 1 m para minimizar el efecto negativo debido al acoplamiento entre ambas salas.

La corrección de Waterhouse no es sino una más de las correcciones sugeridas, con la ventaja de que, al tratarse de una modificación en el cálculo y no en la sistemática de medida y al haberse revelado como verdaderamente importante en las medidas de potencia por intensidad, ha sido abiertamente debatida y finalmente aceptada por toda la comunidad científica sin grandes reparos.

En los campos difusos, la densidad de energía es mayor cerca de las fronteras que lejos de ellas, debido a los fenómenos de interferencia que se producen tanto en bordes, como en esquinas y paredes, siendo estos últimos los de mayor importancia puesto que, en salas de tamaño habitual, contienen mucha más energía que los anteriormente citados.

Si se integran los modelos de interferencia en el volumen de la sala, se puede obtener un término corrector (ignorando los fenómenos sobre bordes y esquinas) W_c correspondiente al cociente entre la energía presente y el valor de energía calculado a partir de medidas de presión en el centro de la sala:

$$W_c = 1 + \frac{S_r \cdot \lambda}{8V}$$

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

(Ecuación 41)

Donde S_r es la superficie total de la sala, V su volumen y λ la longitud de onda. La magnitud logarítmica asociada a dicha energía se denomina corrección de Waterhouse y su expresión viene dada por:

$$K_c = 10 \cdot \log W_c = 10 \log \left(1 + \frac{S_r \lambda}{8V} \right)$$

(Ecuación 42)

Este término corrector, en salas pequeñas, sólo toma valores apreciables a bajas frecuencias, que es cuando la hipótesis inicial de que hay igual flujo de energía en todas las direcciones y en todos los puntos deja de cumplirse, debido a la presencia de modos propios bastante separados entre sí.^{(13) (21)}

5. PROCEDIMIENTOS DE MEDIDA DE AISLAMIENTO

En el presente capítulo se procede a describir los ensayos llevado a cabo para las medidas de aislamiento.

Por una parte se realizó el ensayo mediante medidas de presión acústica según procedimientos de la norma ISO 140-4. Una vez obtenidos los parámetros de dicha norma, se compararon con los obtenidos realizando el mismo ensayo pero con medidas de intensidad acústica. Dichas medidas se describen en la norma ISO 15186-2.

En la ISO 15186-2 se definen una serie de parámetros y condiciones que nos determinarán el grado de precisión de las medidas. Dicha norma tiene tres partes, según el método que se utilice para recorrer las superficies de medida. Se comentará la segunda parte (mediciones in situ) que es la que se ha utilizado y en la que se expone la medición por barrido.

5.1 ENSAYO DE AISLAMIENTO POR MEDIDAS DE PRESIÓN ACÚSTICA. NORMA ISO 140-4

Esta norma especifica los métodos aplicables “in situ” para medir el aislamiento a ruido aéreo de particiones interiores, techos, puertas entre locales, en condiciones de campo difuso y determina la protección aportada a los ocupantes del edificio. Los resultados se expresan en intervalos de frecuencia de tercios de octava.

El ensayo que describe la norma ISO 140-4 consiste en la emisión de un ruido rosa en una habitación (habitación 1) y la medición tanto del ruido recibido en la habitación contigua (habitación 2) como del emitido en la habitación primera, analizándose así el aislamiento de la pared que separa ambas habitaciones.

En definitiva, lo que se evalúa es la potencia emitida y transmitida a través de las medidas de presión realizadas en el ensayo.

Para las habitaciones se utilizará la siguiente nomenclatura:

- Habitación 1: Habitación donde se emitirá el ruido rosa
- Habitación 2: Habitación dónde se medirá la recepción del ruido rosa

Los parámetros medidos durante el ensayo fueron:

- El nivel de presión sonora en las habitaciones 1 y 2 (L_{p1} y L_{p2}). El cual, viene dado por la ecuación:

$$L = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) dB$$

(Ecuación 43)

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Donde L_j son los niveles de presión sonora L_1 a L_n en n posiciones diferentes dentro del recinto. Según la norma en la habitación 1 debe medirse el nivel de presión sonora al menos tres veces por cada posición de la fuente. En nuestro caso se realizaron las medidas para dos posiciones de la fuente distintas, en total fueron seis medidas de presión sonora en la habitación 1.

También cabe destacar que el espectro sonoro en el recinto emisor no debe tener diferencias de nivel mayores de 6 dB entre bandas de tercio de octava adyacentes.

- El tiempo de reverberación en la habitación 2 (Trev)

El tiempo de reverberación es el tiempo que tarda el sonido en apagarse completamente.

- El ruido de fondo de la habitación 2 (No es necesario medirlo en la habitación 1, puesto que el ruido de fondo es mucho más bajo que el ruido de rosa y no perturbará a la emisión). (L_{2fondo}). La norma especifica que el ruido en el recinto receptor debe ser al menos 10 dB superior al ruido de fondo, en caso contrario, son necesarias algunas correcciones del entorno acústico.

Una vez obtenidos los parámetros anteriores, se procede al cálculo del índice de reducción sonora aparente (R) y a la diferencia de niveles (D).

Previamente es necesario obtener el valor de presión sonora real en la habitación 2 restando el ruido de fondo según la ecuación:

$$L_{FINAL} = 10 \text{LOG} \left(10^{\frac{L_{p2}}{10}} - 10^{\frac{L_{p2fondo}}{10}} \right)$$

(Ecuación 44)

Ahora se calculan los valores de aislamiento D y R. Ambos parámetros se calcularían con las ecuaciones vistas 32 y 33 vistas en los apartados anteriores.

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} = L_{p2} - L_{p1} + 10 \log \frac{S_p}{A_2}$$

(Ecuación 32)

$$D = L_{p1} - L_{p2}$$

(Ecuación 33)

S_p sería la superficie de la pared de aislamiento. Y el valor de A_2 vendría dado por la ecuación del tiempo de reverberación:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

$$T_{rev} = 0,16 \frac{V}{A_2}$$

(Ecuación 45)

Sustituyendo en esta ecuación el valor del tiempo de reverberación y el valor de V (el volumen de la habitación), se obtendría el valor de A_2 . Con estos datos, ya se calculan los valores de R y de D para las diferentes bandas de octava. ⁽¹⁵⁾

Para el cálculo de los valores globales, se atiende en el siguiente apartado a la norma ISO 717-1. ^{(23) (24)}

5.2 EVALUACIÓN DE AISLAMIENTO EN LOS EDIFICIOS Y DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN . NORMA ISO 717-1

Los valores calculados en la norma anterior se comparan con valores de referencia a las frecuencias de medición en el rango de 100 Hz a 3150 Hz para bandas de tercio de octava y de 125 a 2000 Hz para bandas de octava.

Para valorar los resultados frente a las normas internacionales ISO 140-3, ISO 140-4, ISO 140-5, ISO140-9 e ISO 140-10 en bandas de octava con precisión de 0,1 dB, se desplaza la curva de referencia en saltos de 1 dB hacia la curva medida hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo mayor posible, pero no mayor de 10 dB.

Se produce una desviación desfavorable en una determinada frecuencia cuando el resultado de las mediciones es inferior al valor de referencia. Sólo se consideran las desviaciones desfavorables.

El valor, en decibelios, de la curva de referencia a 500 Hz, después del desplazamiento, de acuerdo con este procedimiento, es el valor de R_w o del aislamiento bruto, según los datos de la curva empleados. ⁽²⁵⁾

Una vez calculado este valor, se calculan los coeficientes espectrales, C y C_{tr} . Dichos coeficientes están basados en dos espectros en los rangos de frecuencia anteriormente citados. ⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾

C se refiere al aislamiento de la pared para un ruido rosa y C_{tr} se refiere al aislamiento de la pared para un ruido de tráfico urbano. Para calcular estos coeficientes se precisan las siguientes ecuaciones:

$$C = X_{A1} - D_i \quad (\text{Ecuación 46}) \quad X_{A1} = -10 \text{LOG} \sum 10^{(C_i - D_i)}$$

(Ecuación 48)

$$C_{tr} = X_{A2} - D_i \quad (\text{Ecuación 47}) \quad X_{A2} = -10 \text{LOG} \sum 10^{(C_{tr_i} - D_i)}$$

(Ecuación 49)

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

El término de D_i hace referencia a los coeficientes de aislamiento anteriores calculados para cada tercio de banda de octava. Los términos C_i y C_{tri} son valores de referencia del espectro de nivel sonoro. En la tabla siguientes aparecen para las bandas de octava.

f(Hz)	C_i	C_{tri}
125	-21	-14
250	-14	-10
500	-8	-7
1000	-5	-4
2000	-4	-6

Tabla 2. Valores de C_i y C_{tri} de las bandas de octava.⁽²⁴⁾

Los valores de los coeficientes espectrales se redondean sin decimales. Una vez calculados estos valores, el resultado suele expresarse de la siguiente forma:

$$R_w(C; C_{tr})$$

Y los valores de la curva de referencia R_w son los siguientes:

f(Hz)	Valor Referencia
100	33
125	36
160	39
200	42
250	45
315	48
400	51
500	52
630	53
800	54
1000	55
1250	56
1600	56

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

2000	56
2500	56
3150	56

Tabla 3. Valores de referencia de aislamiento de las bandas de tercios de octava.⁽²⁵⁾

Todos los cálculos descritos hasta ahora, en nuestro caso, fueron llevado a cabo por el software del programa dBBATI.

5.3 ENSAYO DE AISLAMIENTO POR MEDIDAS DE INTENSIDAD ACÚSTICA. NORMA ISO 15186-2

El procedimiento de ensayo de la norma ISO-15186 consiste en la medición del nivel de presión sonora medio en el recinto emisor (L_p) y del nivel de intensidad sonora medio en una superficie de medición en el recinto receptor (L_i) para analizar el aislamiento entre las dos habitaciones.

Al igual que anteriormente, en definitiva se pretende medir la potencia sonora, pero esta vez, con medidas de intensidad. Sin embargo, en este caso la potencia emisora no se puede evaluar con medidas de intensidad, por lo que se recurre a medidas de presión.

La medición de L_p se realiza de acuerdo a los procedimientos de la norma 140-4 descritos en el apartado anterior.⁽¹³⁾

La medición de los niveles de intensidad puede realizarse de dos formas: por puntos o por barrido.⁽²¹⁾

5.3.1 MEDICIÓN POR PUNTOS.

Esta metodología consiste en básicamente en realizar medidas con la sonda en una distribución discreta de puntos. Esta forma tiene como ventaja, que proporciona mayor facilidad a la hora de repetir los ensayos, ya que se señalan o marcan los puntos exactos donde se realizan las medidas de manera que una medida se hace exactamente igual a la siguiente, hay menos parámetros a controlar y que, por tanto, puedan perjudicar a la medida.

Su inconveniente es que, requiere de una preparación más compleja y más lenta ya que, en cada medida se necesita la colocación exacta de los micrófonos en los puntos donde se quiera medir. Según la bibliografía, la medición por puntos es más sensible a la distancia de medición.^{(9) (11)}

5.3.2 MEDICIÓN POR BARRIDO

Para la realización de estas medidas, se mueve la sonda de intensidad continuamente a lo largo de trayectorias definidas, sobre cada segmento de la superficie de medida seleccionada. Se regula el instrumento de medida, para obtener la medida temporal de la intensidad acústica y de la presión acústica, sobre la duración total de un barrido sobre un segmento. Se efectúa la operación de barrido de manera que la trayectoria especificada de barrido sea seguida con precisión, que el eje de la sonda se mantenga perpendicular a la superficie de medida en todo momento, y que la velocidad de movimiento de la sonda sea uniforme. Según la norma, dicha

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

velocidad debe estar entre 0,1 y 0,3 m/s y la duración del barrido no debe ser menor de 20 s. La distancia de medición debe estar entre 0,1 y 0,3 m.

Es importante que durante el barrido manual, el operador no permanezca enfrente del segmento que está siendo barrido, sino a un lado de forma que su cuerpo no interfiera con la radiación del sonido desde la fuente.

El barrido, puede ser mecánico, lo cual favorece las condiciones descritas en la norma. Sin embargo, para un barrido manual, como en nuestro caso, es imposible que las condiciones se cumplan estrictamente. A pesar de ello, el hecho de que la norma haga mención de estas condiciones en estos términos, nos debe hacer ver que realmente es importante cumplir con las especificaciones citadas, por lo que se debe tener sumo cuidado en la realización del ensayo. ⁽²¹⁾

Las trayectorias seguidas durante el ensayo fueron las que se describen en la siguiente figura:

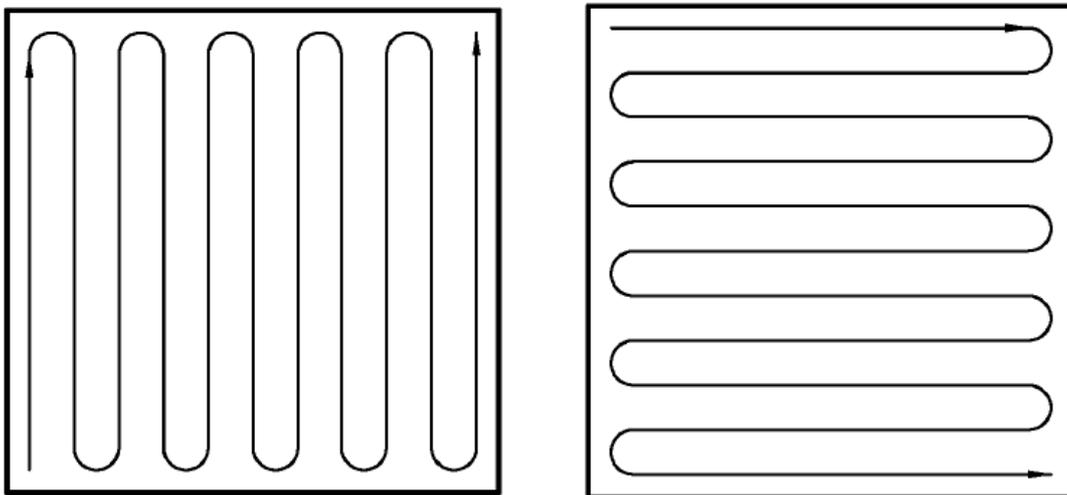
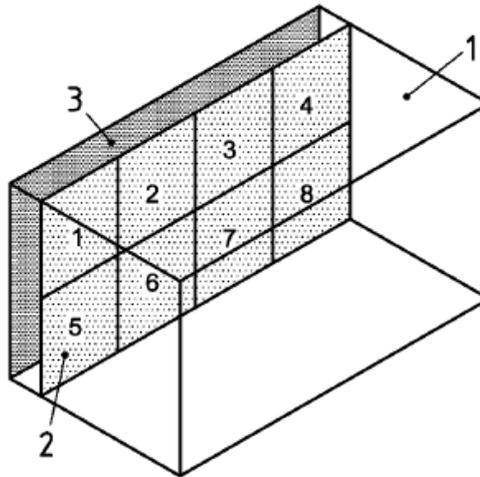


Figura 7. Trayectorias del barrido manual. ⁽⁹⁾

En el presente proyecto, se realizaron tanto ensayos por barrido como ensayos por puntos y se compararon los diferentes resultados obtenidos.

Se procede a continuación a describir la superficie de medición. Dicha superficie debe envolver totalmente al elemento de construcción sometido a ensayo. Se divide la superficie en varias sub-áreas, en cada una de las cuáles se realizan los barridos correspondientes o las mediciones por puntos. En el ensayo de aislamiento, obviamente, la superficie de medición se corresponde con la de la pared de separación entre las dos habitaciones. En la siguiente figura se esquematiza un ejemplo del sistema con ocho sub-áreas de medición:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro



Leyenda

- 1 Recinto receptor
- 2 Superficie de medición dividida en ocho sub-áreas
- 3 Elemento de construcción sometido a ensayo (zona sombreada)

Figura 10. Superficie de medición dividida en ocho sub-áreas. ⁽²¹⁾

Una vez obtenidos los valores de presión e intensidad, los parámetros a calcular según la norma serían el índice de reducción sonora por intensimetría (R_i), el indicador de presión-intensidad de la superficie (F_{pIn}) y el índice de intensidad-presión residual (δ_{pi0})

Cada uno de ellos viene dado por las ecuaciones anteriormente descritas:

$$R'_I = \left[L_{p1} - 6 + 10 \lg \left(\frac{S}{S_0} \right) \right] - \left[\bar{L}_{I_n} + 10 \lg \left(\frac{S_M}{S_0} \right) \right]$$

(Ecuación 50)

(NOTA: Esta ecuación se deduce de la número 35 deducida en el apartado anterior)

$$F_{pIn} = 10 \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{S_M} \sum_{i=1}^M S_{M_i} \times 10^{0,1 \bar{L}_{p_{ij}}} \right] - \bar{L}_{I_n} \text{ dB}$$

(Ecuación 51)

donde:

L_{p1} : nivel de presión sonora en la habitación emisora

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

L_{in} : nivel de intensidad sonora medio en la habitación receptora que vendría dado por la ecuación 39 del apartado anterior.

S_M : área total de la superficie de medición (Sumatorio de las áreas de todas las sub-áreas de medición)

S : área del elemento de separación sometido a ensayo o, en el caso de recintos escalonados, esa parte del área común del recinto emisor y receptor

$$S_0 = 1 \text{ m}^2$$

N : Posiciones del altavoz

El indicador de presión-intensidad sirve para calificar el entorno de medición. Un entorno se considera satisfactorio si cumple los siguientes criterios para cada banda de tercio de octava:

$$F_{pIN} < \delta_{pIO} - 7 \text{ dB} \quad \text{Para la muestra de ensayo reflectante}$$

$$F_{pIN} < 6 \text{ dB} \quad \text{Para la muestra de ensayo absorbente}$$

Una muestra de ensayo se considera absorbente si el coeficiente de absorción excede de 0,5.

Según la norma ISO-11654 un material puede considerarse reflectante si su coeficiente de absorción se encuentra entre los valores de 0,1 y 0,05. Los materiales que componen la habitación sometida a ensayo son básicamente: pared de ladrillo, vidrio y madera. Los coeficientes de absorción de cada uno de estos materiales son 0.02, 0.04 y 0.03 respectivamente. Puesto que estos valores están por debajo de los valores anteriores, se considera la habitación reflectante.

Si la intensidad sonora resultase negativa o si no se cumpliesen los criterios previamente descritos es necesario mejorar el entorno de medición aumentando la distancia de medición o añadir material de absorción acústica en la habitación.

Los valores del índice de residual de presión-intensidad vienen dados según la tabla siguiente:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Requisitos mínimos relativos al índice presión-intensidad residual para sondas, procesadores e instrumentos con una separación nominal entre micrófonos de 25 mm, en decibelios

Frecuencia central de la banda Hz	Sonda		Procesador		Instrumento	
	Clase 1	Clase 2	Clase 1	Clase 2	Clase 1	Clase 2
50	13	7	19	13	12	6
63	14	8	20	14	13	7
80	15	9	21	15	14	8
100	16	10	22	16	15	9
125	17	11	23	17	16	10
160	18	12	24	18	17	11
200	19	13	25	19	18	12
250	20	14	26	20	19	13
315	20	15	26	20	19	14
400	20	16	26	20	19	14,5
500	20	17	26	20	19	15
630	20	18	26	20	19	16
800	20	18	26	20	19	16
1 000	20	18	26	20	19	16
1 250	20	18	26	20	19	16
1 600	20	18	26	20	19	16
2 000	20	18	26	20	19	16
2 500	20	18	26	20	19	16
3 150	20	18	26	20	19	16
4 000	20	18	26	20	19	16
5 000	20	18	26	20	19	16
6 300	20	18	26	20	19	16

Tabla 4. Índices residuales de presión- intensidad ⁽⁹⁾

NOTA: Para los requisitos relativos al índice de presión-intensidad residual para separaciones entre micrófonos distintas a 25 cm, añadir $10\log(x/25)$ donde x es la separación entre micrófonos en milímetros a las cifras, en decibelios de la tabla.

Para nuestro caso se escoge la columna de la sonda clase 1 y puesto que tenemos una separación distinta a 25 mm, añadimos $10\log(x/25)$ a los datos que vienen en la tabla, donde x sería 18 mm.

Por último a la ecuación 50 del índice de reducción sonora es necesario añadirle el coeficiente K_c para comparar los resultados de intensidad con los obtenidos con medidas de presión de la norma 140-4. Dicho coeficiente viene dado por la ecuación 42:

$$K_c = 10 \log W_c = 10 \log \left(1 + \frac{S_r \lambda}{8V} \right)$$

Una vez obtenidos estos valores, se añadirían en la ecuación 49 para calcular el aislamiento. ⁽²¹⁾

6. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA

En el siguiente capítulo se procederá a describir los equipos utilizados para la realización de los ensayos de medición, así como la descripción del software empleado para el tratamiento de los resultados obtenidos. Se describirán los elementos para la medida de presión y la de intensidad acústica.

6.1 MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD ACÚSTICA:

1. Sonda de intensidad

Para la medición de la intensidad acústica y posteriormente su transformación en potencia se empleó una sonda G.R.A.S. 50AI-B. Junto con lo que constituye estrictamente la sonda, se incluyen micrófonos, preamplificadores... En la siguiente figura se presenta la sonda de intensidad:



Figura 8. Sonda de intensidad 50 AI ⁽¹⁸⁾

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Junto con lo que constituye estrictamente la sonda, se incluyen micrófonos, preamplificadores... En la siguiente figura pueden observarse dichos constituyentes:

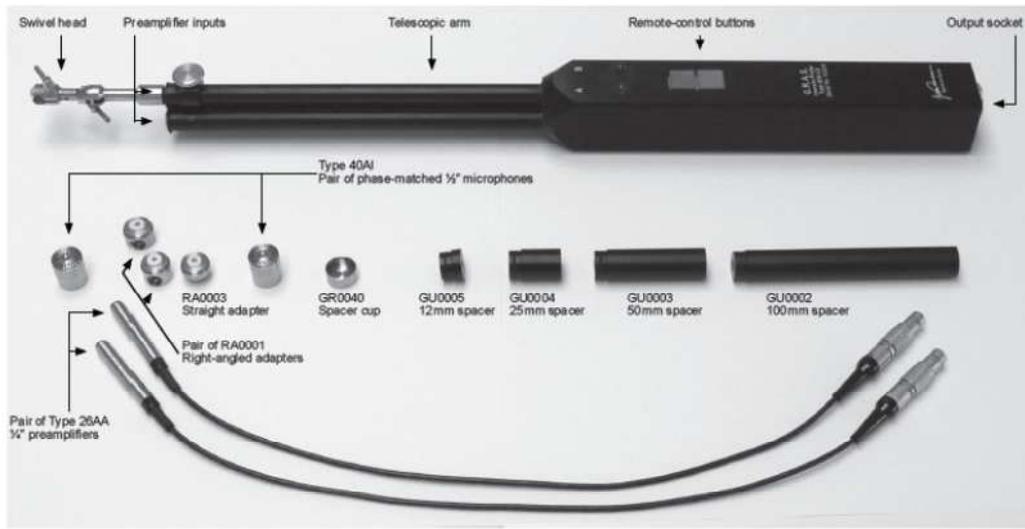


Figura 9. Componentes de la sonda de intensidad 50 AI ⁽¹⁸⁾

En la figura pueden apreciarse los dos micrófonos necesarios para medir la intensidad, diferentes separadores de dichos micrófonos según convenga para la medida, los preamplificadores y por supuesto diferentes adaptadores para la conexión de todos ellos.

2. Unidad Symphonie

Para la adquisición de los datos, es necesaria la unidad Symphonie que transforma las señales recogidas por la sonda y las envía al procesador, constituido por un ordenador con un software determinado que será descrito en apartados próximos.

En la siguiente figura pueden apreciarse dichos componentes:



Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Figura 10. Unidad symphonie

3. Fuente dodecaédrica

La realización del ensayo de aislamiento implica la emisión de un ruido rosa o blanco y la medición de la atenuación de ese sonido en la sala receptora. Para la emisión de dicho ruido se empleó una fuente de sonido dodecaédrica, como la mostrada en la figura conectada a un amplificador y a un preamplificador e introducida en la salida que ofrece el equipo de captación Symphonie.

Lo que caracteriza a dicha fuente es que debe emitir igual en todas direcciones, para minimizar al máximo los errores de emisión.

En la siguiente figura puede apreciarse la fuente sonora:



Figura 11. Fuente dodecaédrica

6.2 MEDICIÓN DE LA PRESIÓN ACÚSTICA:

- Micrófonos

Para la medición de presión acústica y posteriormente su transformación en potencia, se emplearon micrófonos conectados a la unidad de Symphonie.

Un ejemplo de dichos micrófonos se muestra a continuación:



Figura 12. Micrófono G.R.A.S.

6.3 . DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE MEDIDA

El paquete informático de medida utilizado para la adquisición de los datos del ensayo es conocido como 01 dB-Stell, el cual permite desde la medida del tiempo de reverberación hasta las medidas de intensidad. El presente apartado se centrará únicamente en los dos software necesarios para los ensayos realizados: el dBBATI y el dBFa.

1. dBBATI

El programa dBBATI permite recoger los datos referentes a los ensayos de presión. En el ensayo de aislamiento se adquieren los datos de tiempo de reverberación del entorno acústico así como calcular los parámetros R y D característicos del aislamiento de la pared y los valores de potencia.

2. dBFa

El programa dBFa fue el más empleado en los ensayos acústicos realizados. El software permite manipular los datos de intensidad acústica para el cálculo de la potencia y el aislamiento de la pared de ensayo. Además se incluye una opción para calcular la potencia según la norma ISO-9614, eligiendo el modo de adquisición (por barrido o por puntos discretos) obteniéndose los parámetros de intensidad y de potencia citados en dicha norma. Incluso, se incluyen los citados con anterioridad mapas de ruido de la superficie de medida que envuelve la fuente bajo estudio. Esta opción nos permite hacernos una idea muy gráfica de donde se concentra el sonido, demostrando así la gran utilidad de usar el parámetro de la intensidad acústica con carácter vectorial. ⁽²²⁾

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

7. INSTRUCCIONES DEL SOFTWARE DE MEDIDA

En el presente capítulo se explicará detalladamente el uso del software para la realización de las medidas de los ensayos, tanto de presión como de intensidad. Primeramente se comentarán los pasos seguidos en el software dBATI (para las medidas de presión) y después se seguirá el mismo procedimiento para el software dBa (para las medidas de intensidad).

7.1 GUÍA DE UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA dBATI.

A continuación se procede a explicar los pasos a seguir en el programa para obtener los parámetros correspondientes al aislamiento acústico de la habitación.

1. Una vez abierto el programa, se pide una sesión de medida nueva, haciendo clic en la opción "Nuevo" del menú "Adquisición" de la barra de tareas.

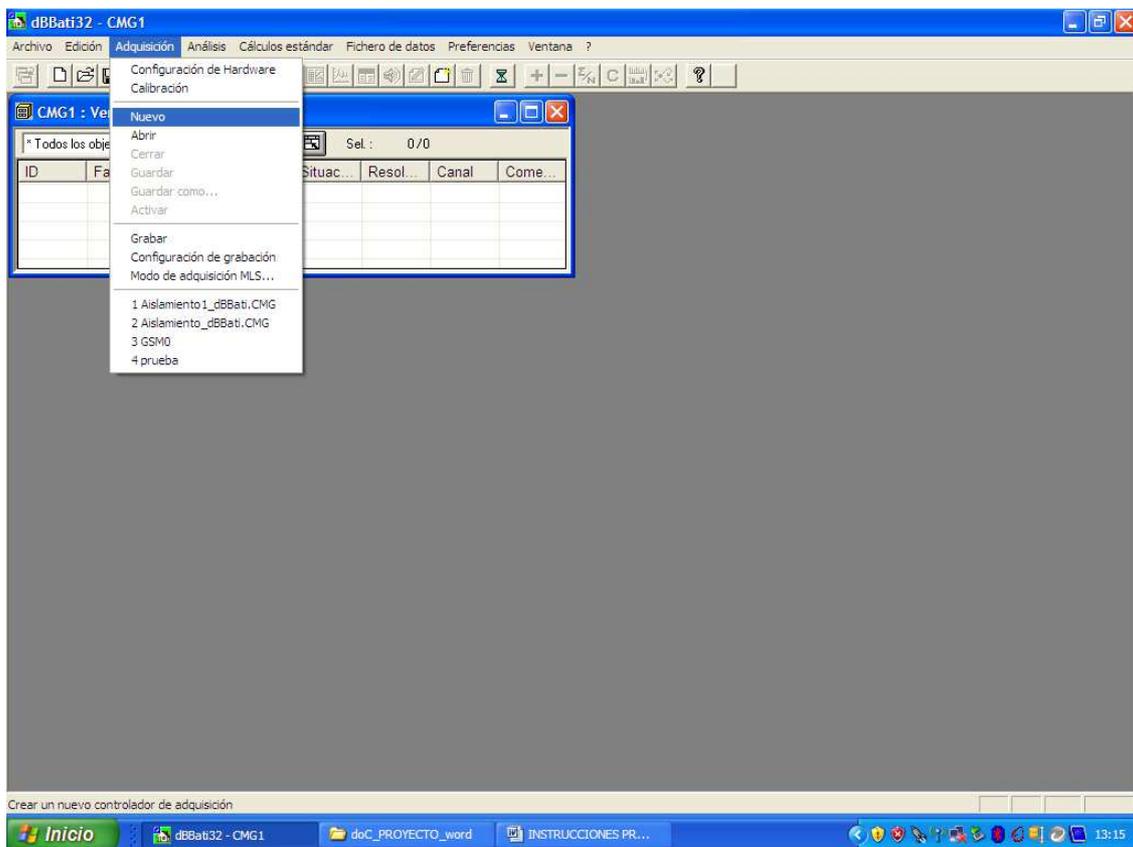


Figura 13

2. En la ventana que aparece se ofrecen dos opciones: Configurar o Parámetros. Con el botón configurar se despliega el menú para elegir los ensayos que se vayan a realizar. En nuestro caso, seleccionamos el tiempo de reverberación, el ruido emitido y recibido en cada habitación y el ruido de fondo.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

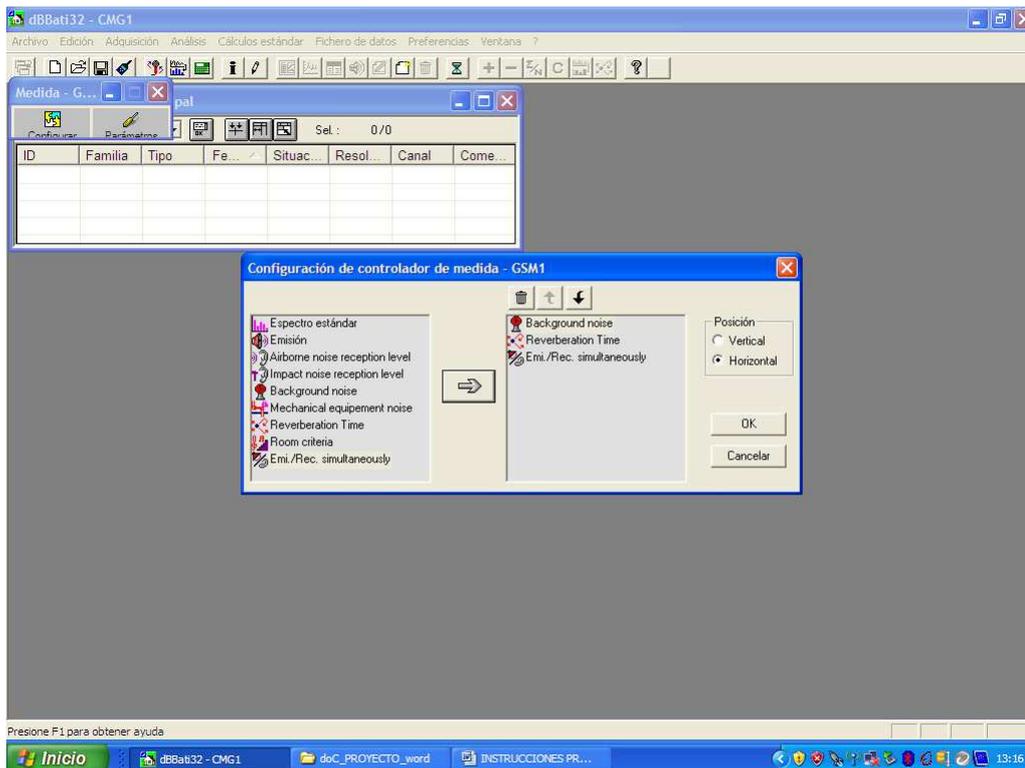


Figura 14

3. Ahora, pulsando en la pestaña de "Parámetros" modificamos las opciones del ensayo como por ejemplo tiempo de medida, número de medidas... En nuestro caso, se escoge la opción "Fuente interrumpida", ya que se va a usar un ruido blanco emitido por la fuente durante un determinado tiempo. Para el caso particular del tiempo de reverberación, se obtendrá el tiempo que tarda la señal en decaer 60 dB.

Para la medición en la sala receptora se establecen tres medidas, en tres sitios diferentes de la habitación y se mide el ruido de fondo según lo que diga la norma ISO 140-4.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

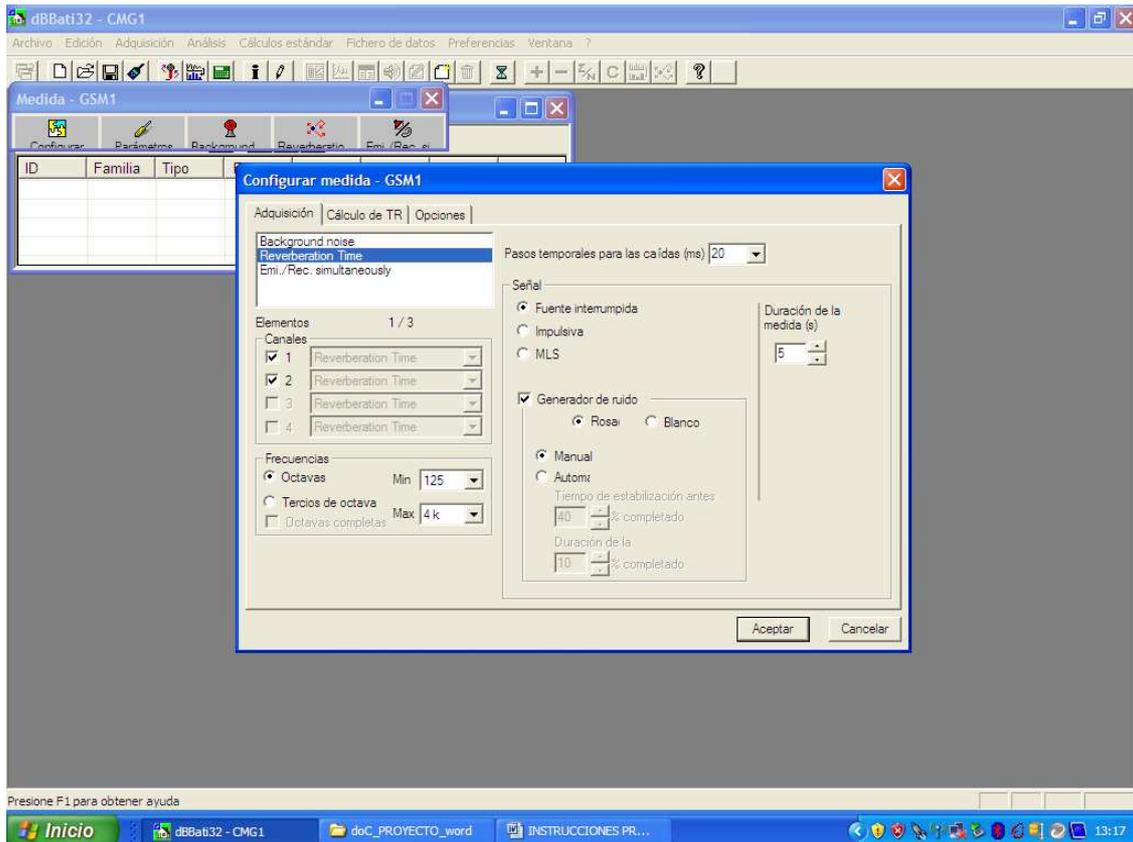


Figura 15

4. Por último en la pestaña "Opciones"

Se opta por realizar el cálculo sobre varias medidas y se selecciona la opción de medida retardada, con un retardo de 5 s. Este tiempo establece un margen para el comienzo de la medida para poder movernos dentro de la habitación antes de que empiece a medir el programa.

También se establece la opción de Autorango que permite un control automático de la ganancia de los micrófonos antes de la medida, así se evitan posibles saturaciones durante la realización de la medida.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

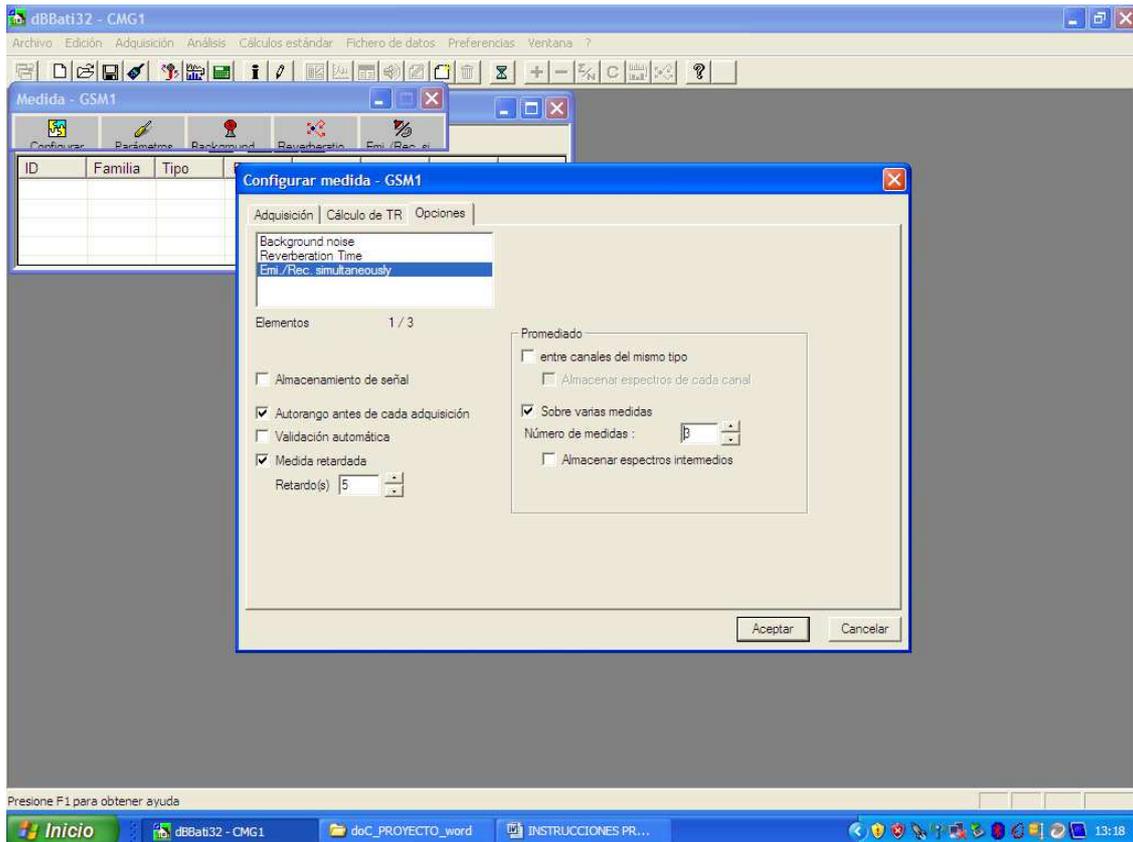


Figura 16

5. Una vez, elegidas todas las opciones se comienzan las medidas haciendo clic en "Aceptar".
6. En ese momento, seleccionamos el parámetro que se vaya a medir (ruido de fondo, emisión, recepción...) y aparece la siguiente ventana de medida para el caso de ruido de fondo:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

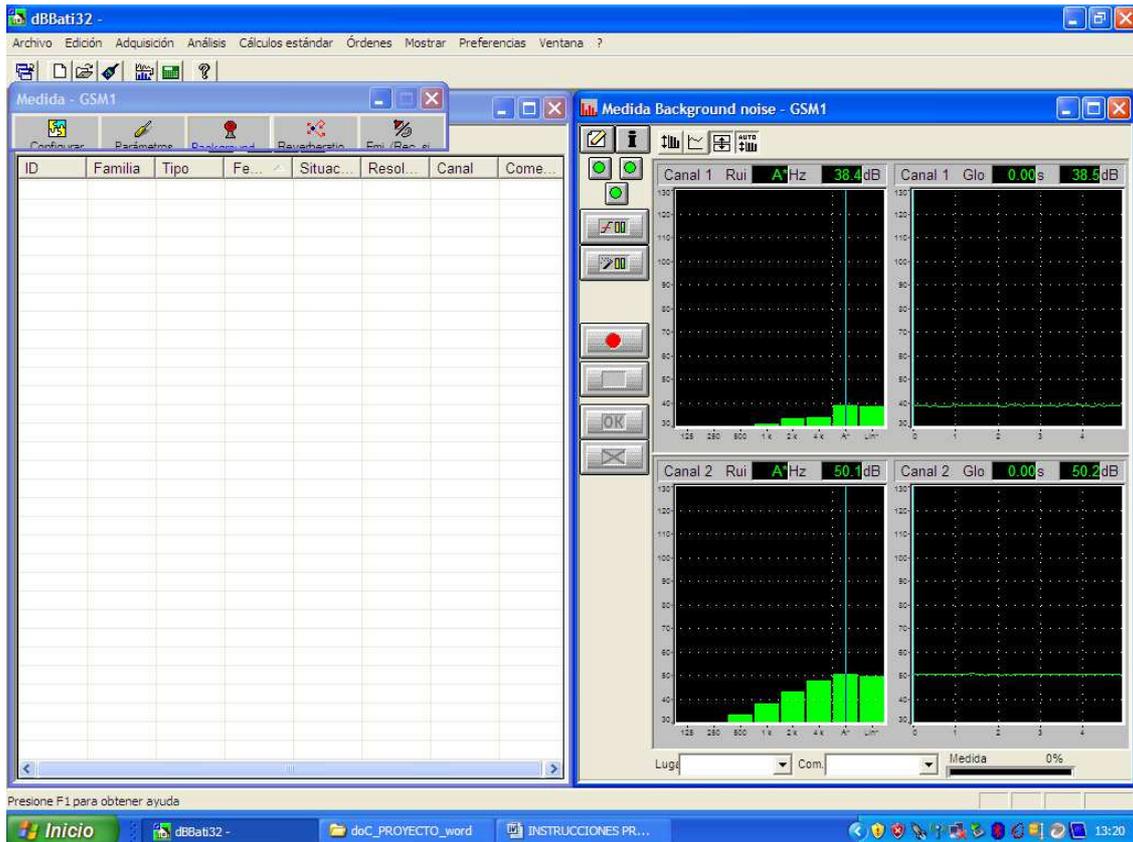


Figura 17

Haciendo clic en el botón rojo ya se puede empezar a realizar las medidas.

Si la magnitud que se va a medir es el tiempo de reverberación, aparece la siguiente ventana una vez realizadas las medidas:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

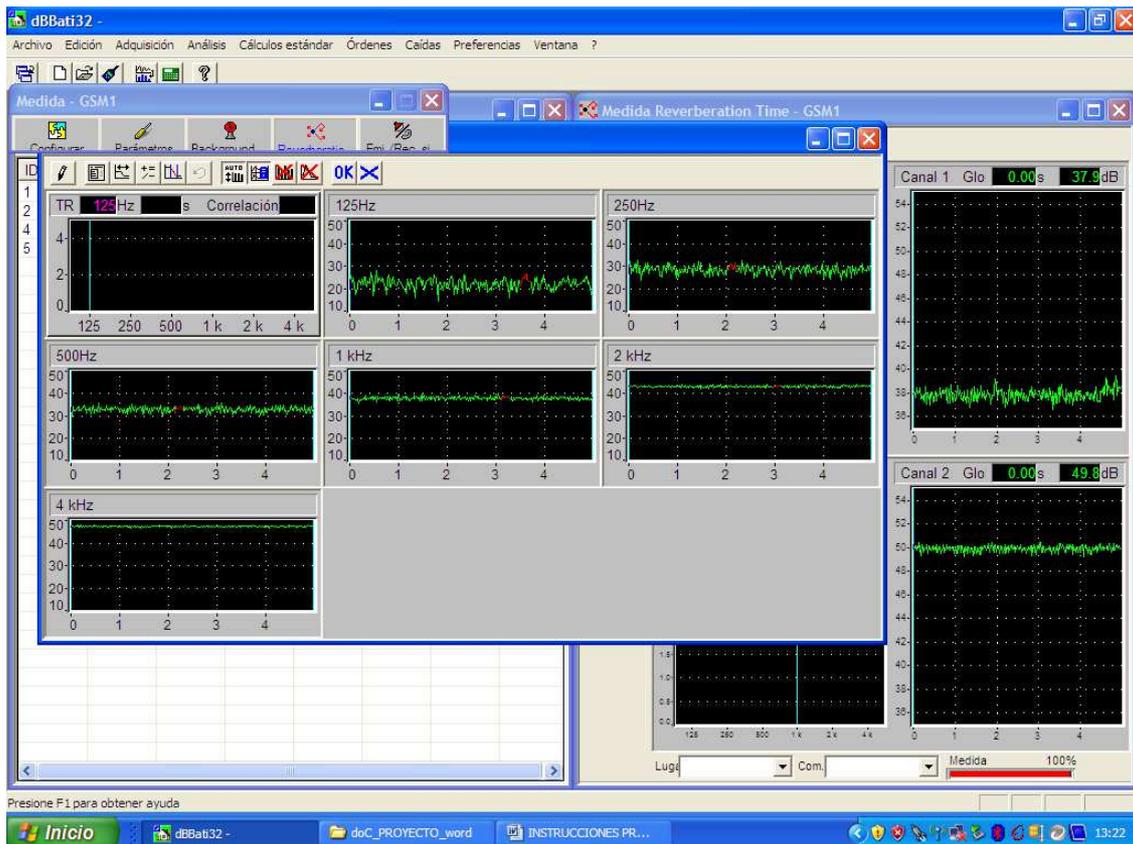


Figura 18

Se aprecia un salto perfectamente hacia la mitad de cada gráfica que se puede ajustar manualmente si el programa no ha escogido con suficiente precisión en el tramo en el que ocurre el salto.

Una vez la medición haya terminado, se activarán los dos botones señalados por debajo de este y que nos permiten aceptar la medida, si creemos que ha sido correcta su realización (botón Ok) o desecharla si pensamos que no es válida (botón X).

7. Con las medidas aceptadas, se obtiene la representación para cada banda de octava o de tercio de octava de cada parámetro: tiempo de reverberación, espectro de emisión, recepción y ruido de fondo.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

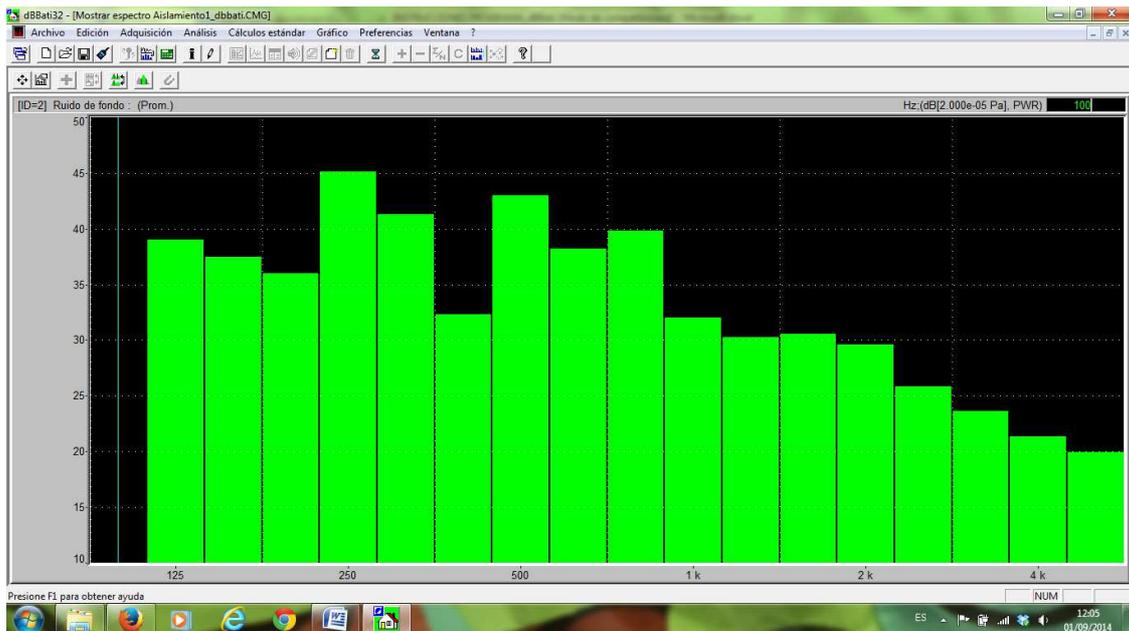


Figura 19

8. Una vez obtenidos los parámetros de medida se hace clic en la pestaña de cálculos estándar para que el programa determine los parámetros de aislamiento R y D solicitados en la norma 140-4.

Nos vuelve a aparecer una ventana con dos opciones: Configurar y parámetros. Haciendo clic en "Configurar" se despliega un menú para elegir lo que queremos calcular:

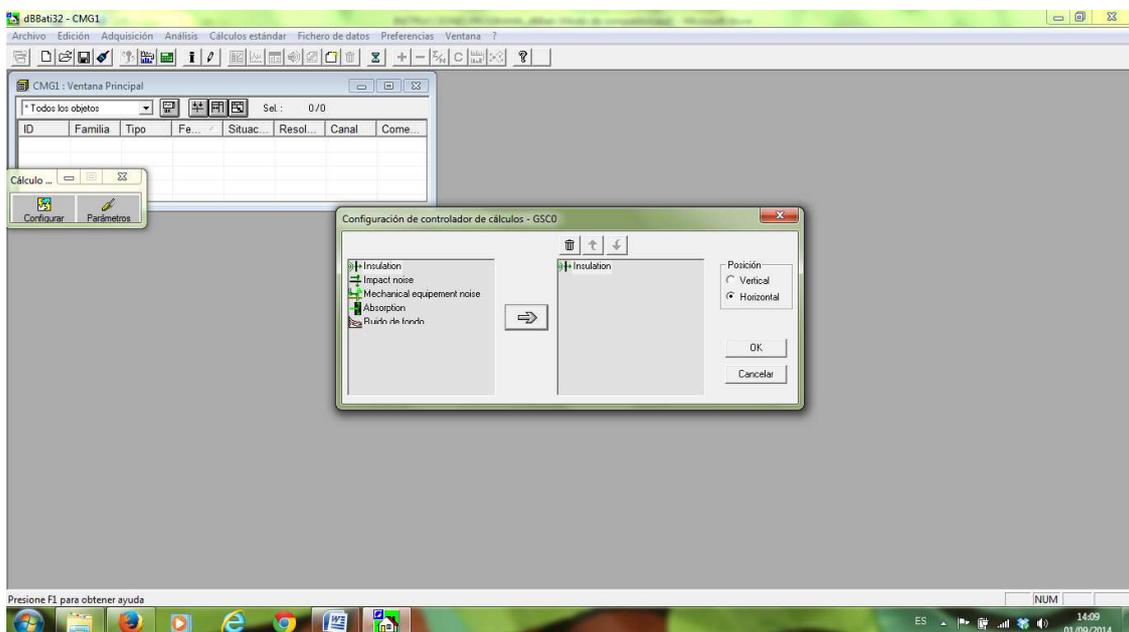


Figura 19

Nosotros elegimos la opción de aislamiento (insulation) y aceptamos.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

9. A continuación aparece una nueva ventana para elegir los parámetros a calcular según la norma que se desee:

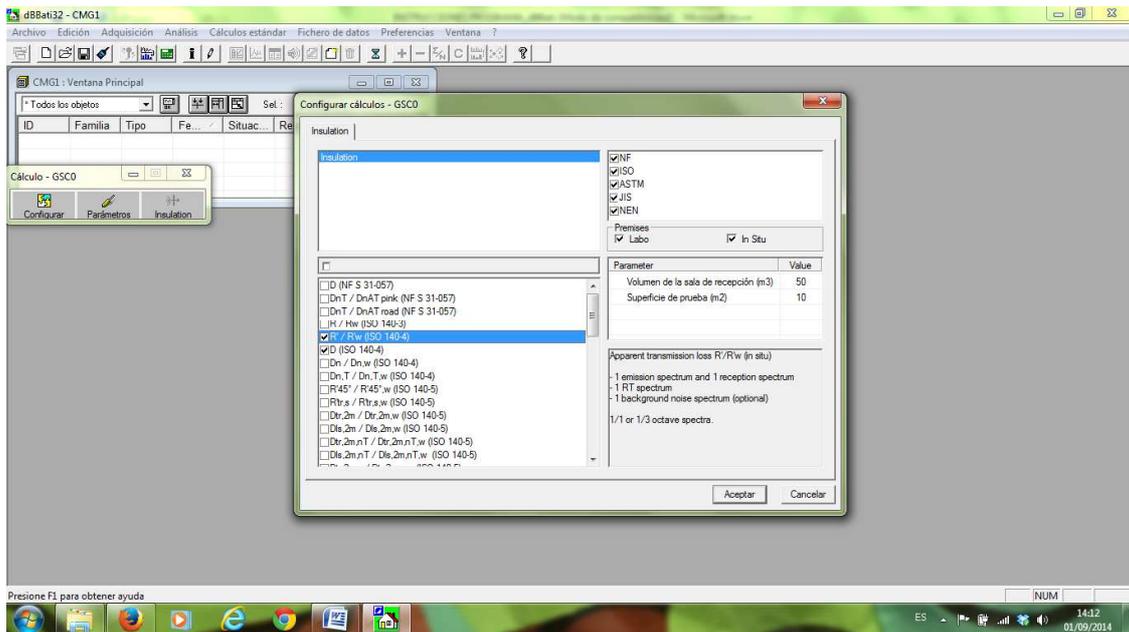


Figura 20

Se eligen los parámetros R y D de la norma 140-4 y además se introduce el volumen de la habitación y la superficie de medida en dicha ventana. Se seleccionan de todas las medidas realizadas aquellas que se quiera utilizar en el cálculo: ruido de fondo, espectros de emisión y recepción y tiempo de reverberación.

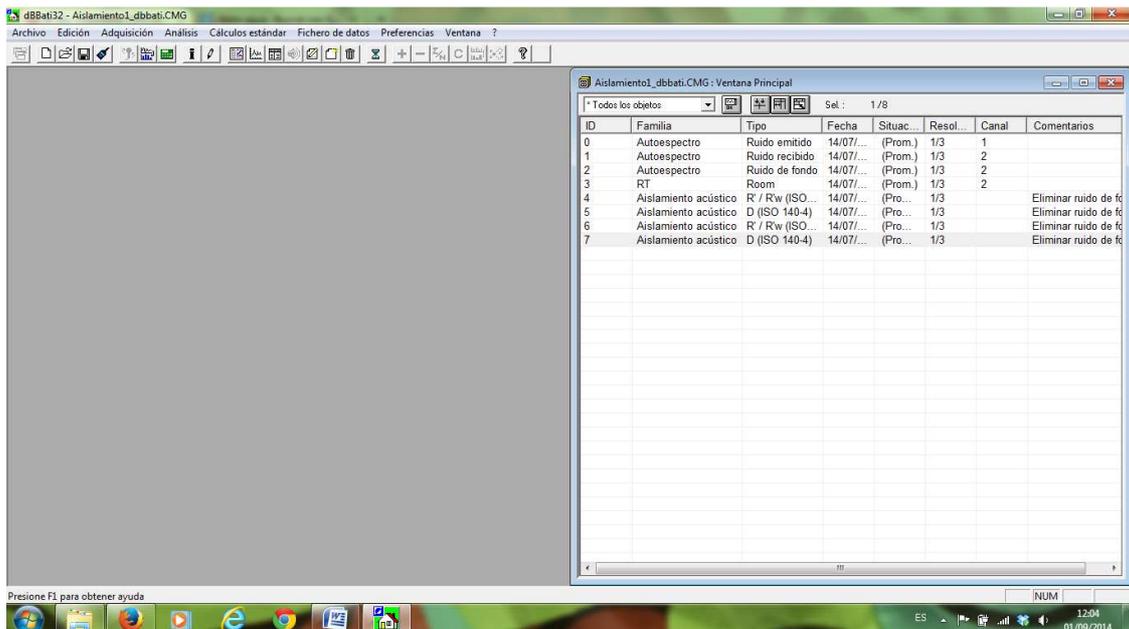


Figura 21

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Haciendo click en los parámetros anteriores de la figura 18 pueden observarse los resultados de los espectros de los coeficientes de aislamiento R y D. En la siguiente figura pueden observarse la forma en que presenta el programa dichos resultados:

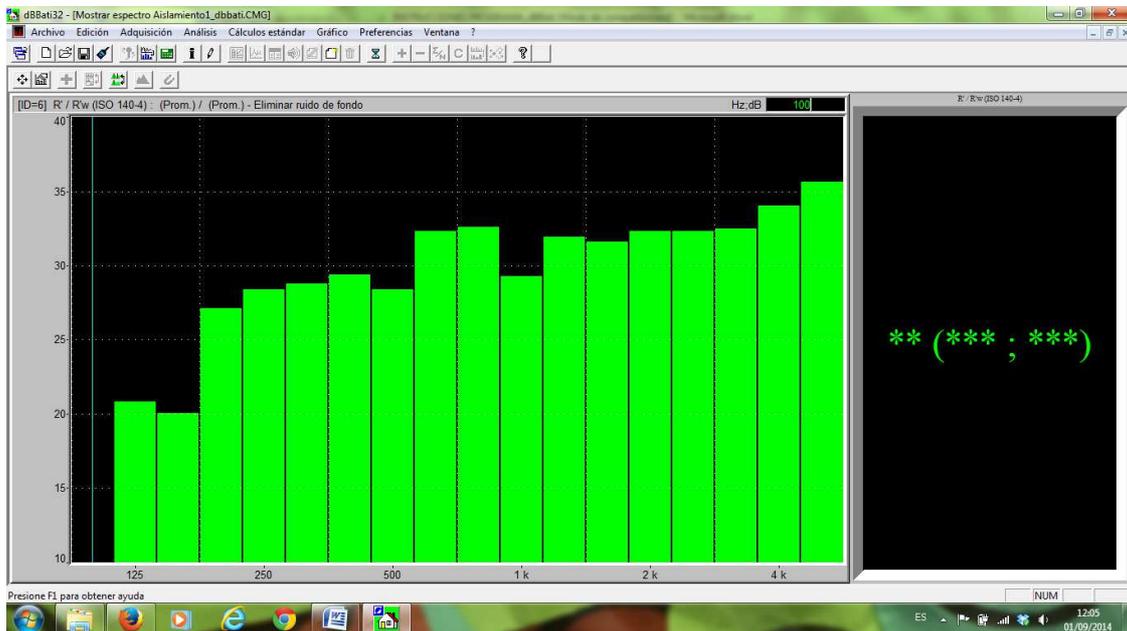


Figura 22

En nuestro caso, no aparecieron los resultados numéricos por problemas en las medidas del ruido de fondo como puede observarse en la figura, sin embargo se calcularon manualmente en el apartado de resultados. ⁽¹⁹⁾

7.2 GUÍA DE UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA dBFa

Siguiendo con el apartado anterior se procede ahora a describir los pasos de utilización del programa dBFa. El programa proporciona dos opciones según se quiera realizar una medida de intensidad haciendo referencia a la geometría de la superficie de medida (según la norma ISO 9614) o el caso contrario sin atender a la geometría de la superficie de medida (measurement session). Aunque en principio, la norma ISO 9614 está pensada sólo para medidas de potencia, en esta opción, el programa permite incluir más información del sistema de medida que en la "measure session". ⁽¹⁴⁾ Sobre todo, ofrece una clara ventaja a la hora de numerar las medidas según las sub-caras de medición en las que se divide la superficie del ensayo. Por ello, en el presente proyecto, para la realización de determinados ensayos se utilizó más esta opción.

A continuación se explican los pasos a seguir para cada una de las opciones:

7.2.1 MEASUREMENT SESSION

1. Para el ensayo de aislamiento con una fuente externa es necesario previamente al abrir un archivo nuevo en el programa elegir la opción de "Measurement session".

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

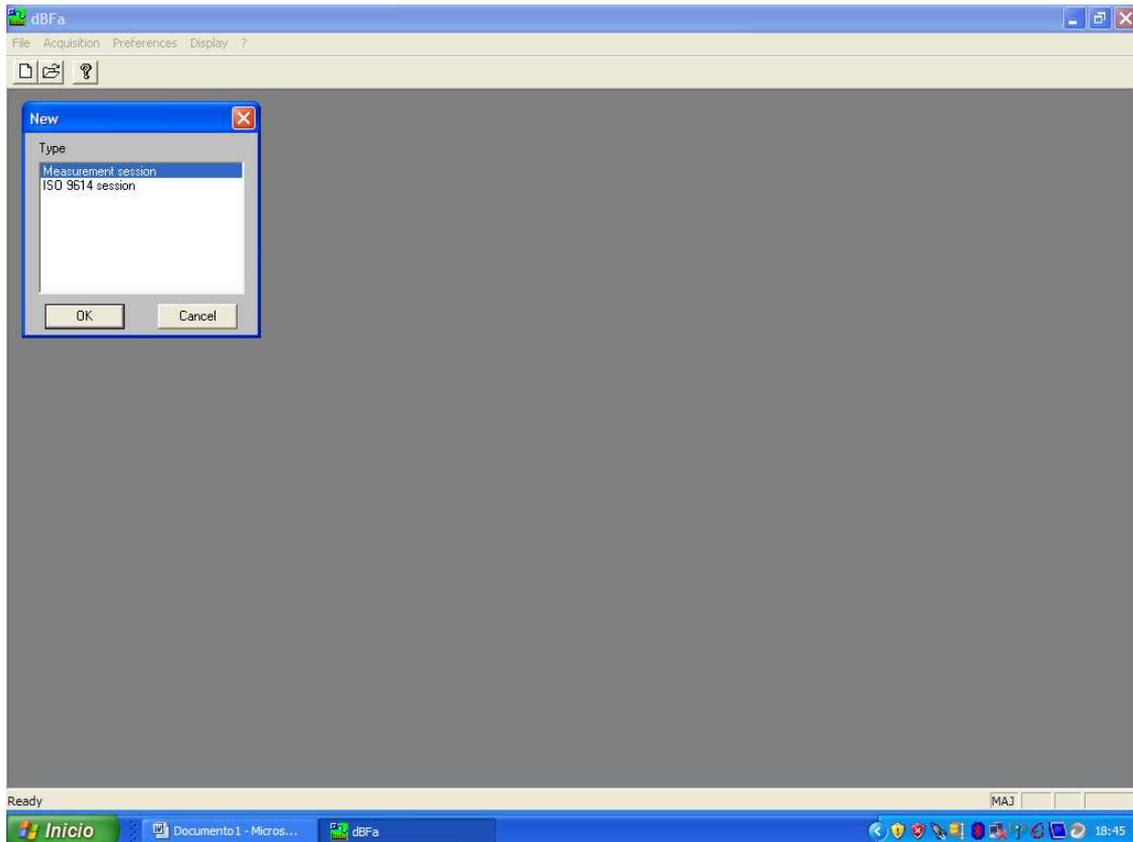


Figura 23

2. A continuación en la pestaña de "adquisition" se hace clic en la opción de "New measurement set-up"

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

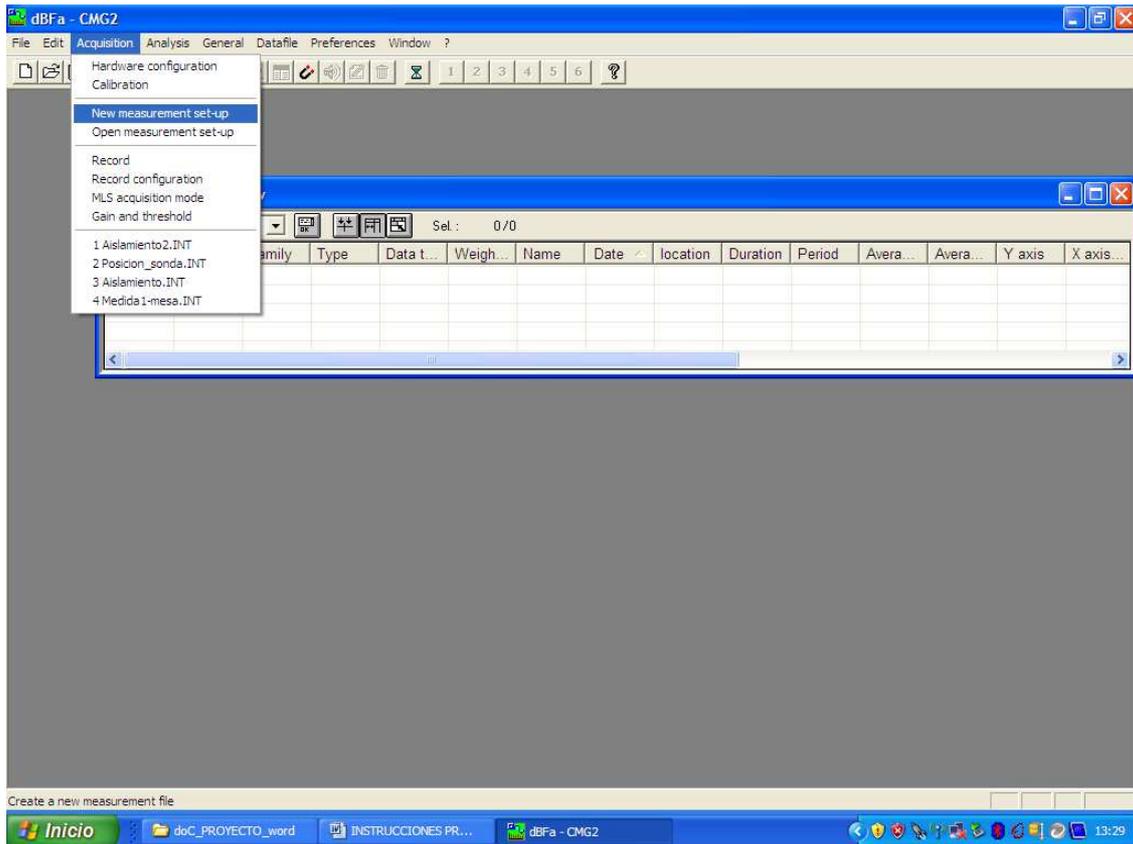


Figura 24

3. Aparece un menú con tres tipos diferentes de ensayos para realizar la medida. Se elige el "intensity mode"

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

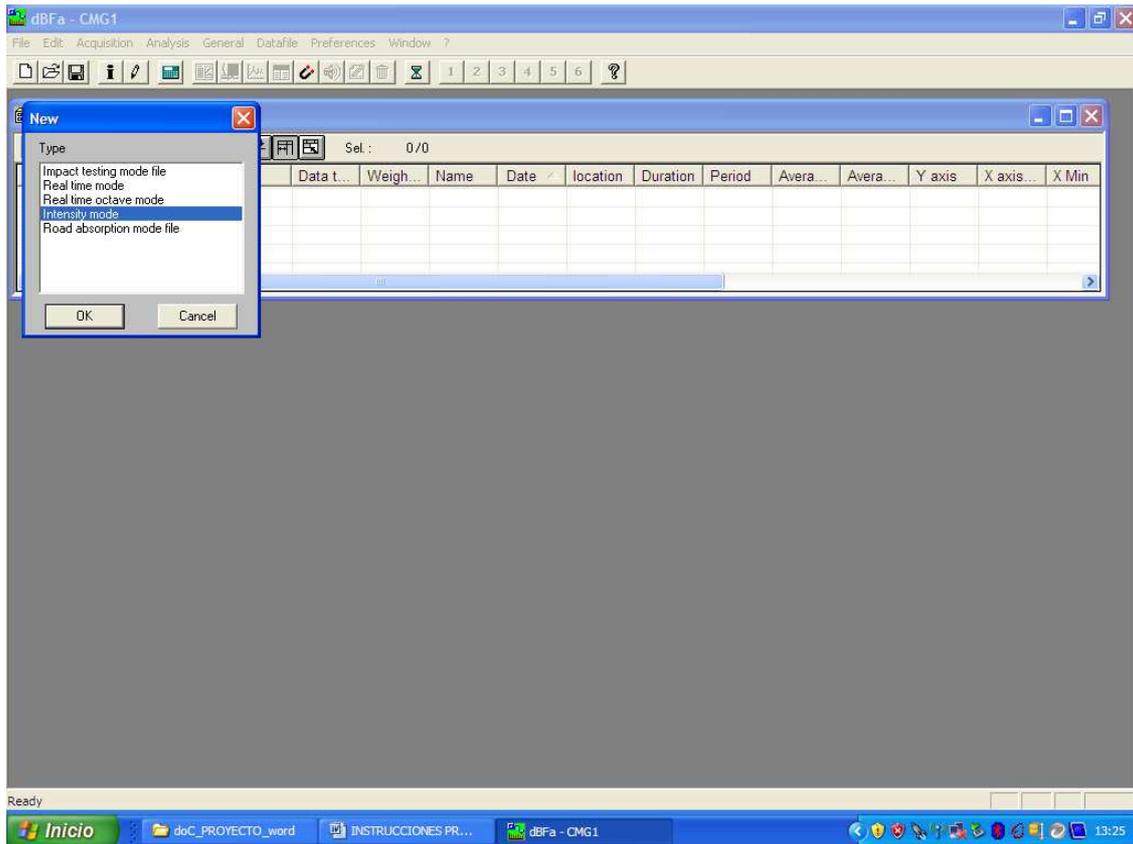


Figura 25

4. Ahora aparece un nuevo menú para elegir las opciones del ensayo de medida

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

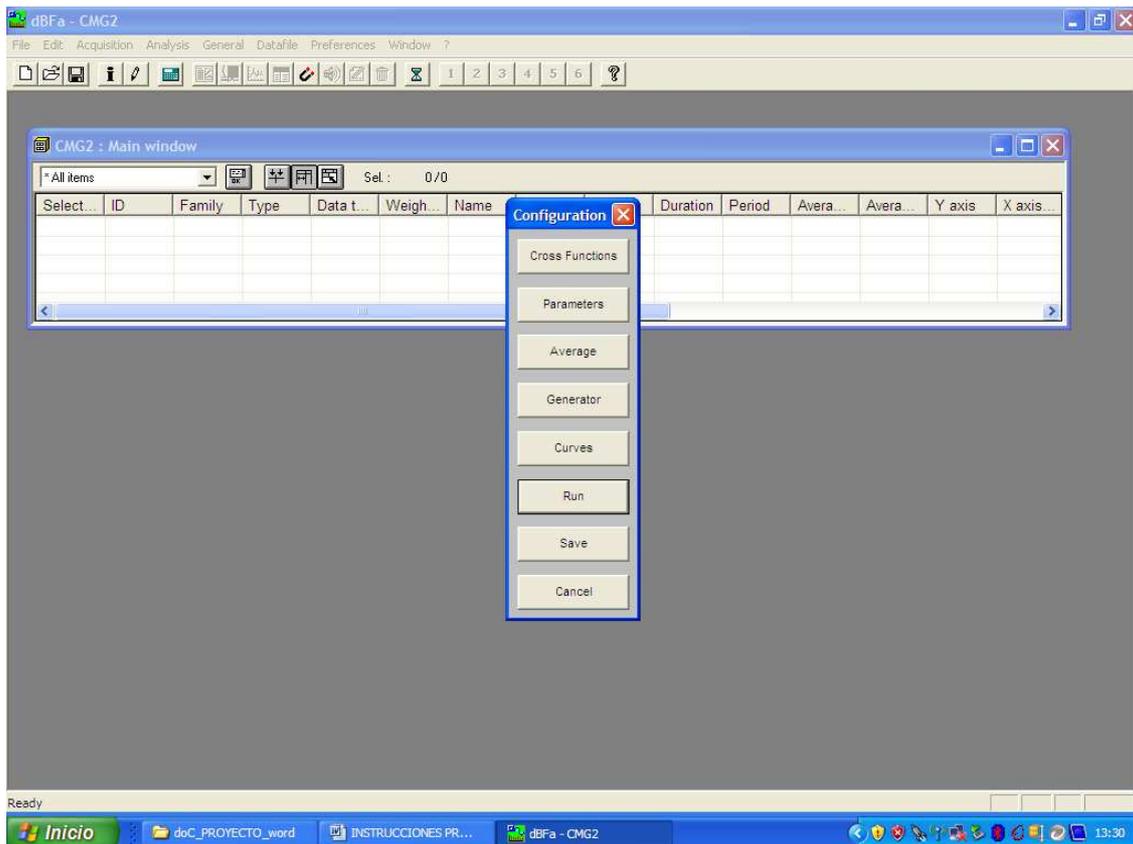


Figura 26

5. Haciendo clic en “Parameters” aparece una nueva ventana donde se puede cambiar el espaciado de los micrófonos, la velocidad del sonido y la densidad del aire. Nosotros sólo hemos marcado la opción del autorango automático, al igual que en el programa del dBATI y en el “Storage mode” se hace clic en la opción de “Customized” para pedirle al programa que sólo nos almacene las medidas de intensidad y de presión en un tercio de octava. Serían “Li 1/3” y “Lp 1/3”.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

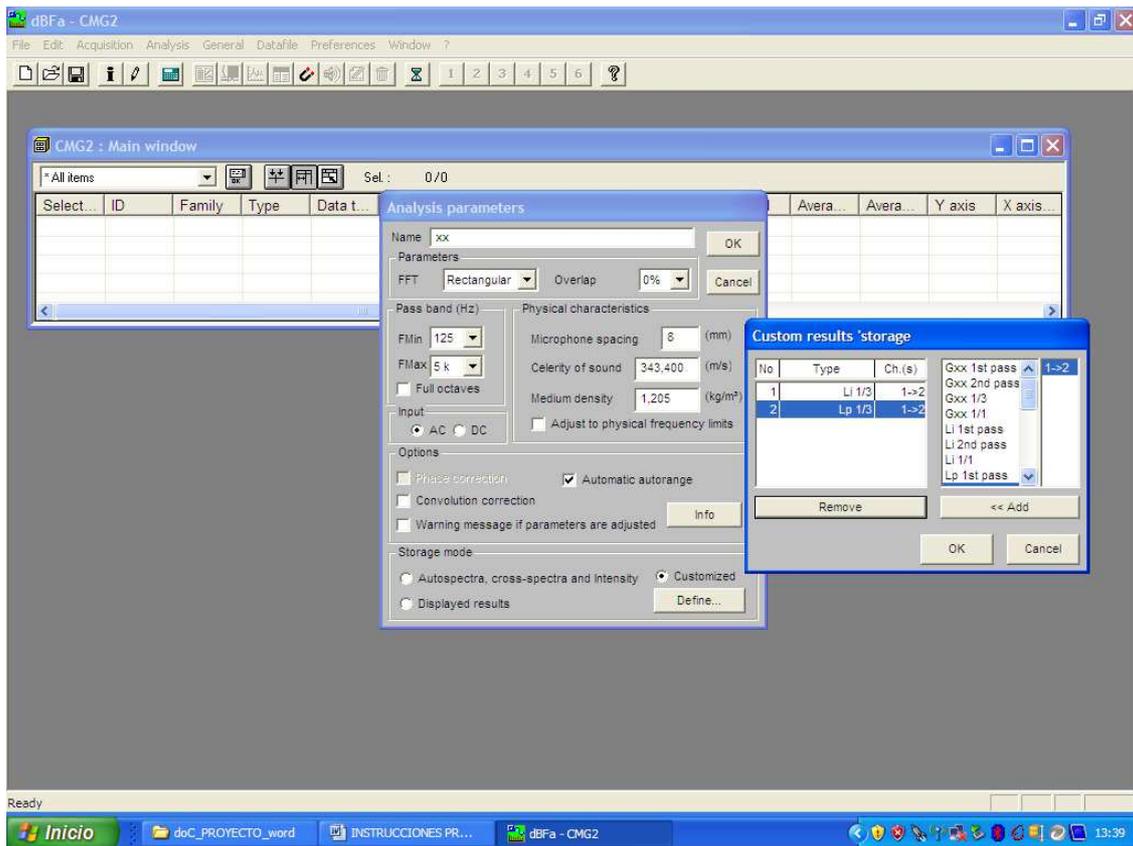


Figura 27

6. Haciendo clic en "Generador" activamos la opción de la fuente de ruido externa con un ruido rosa en nuestro caso.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

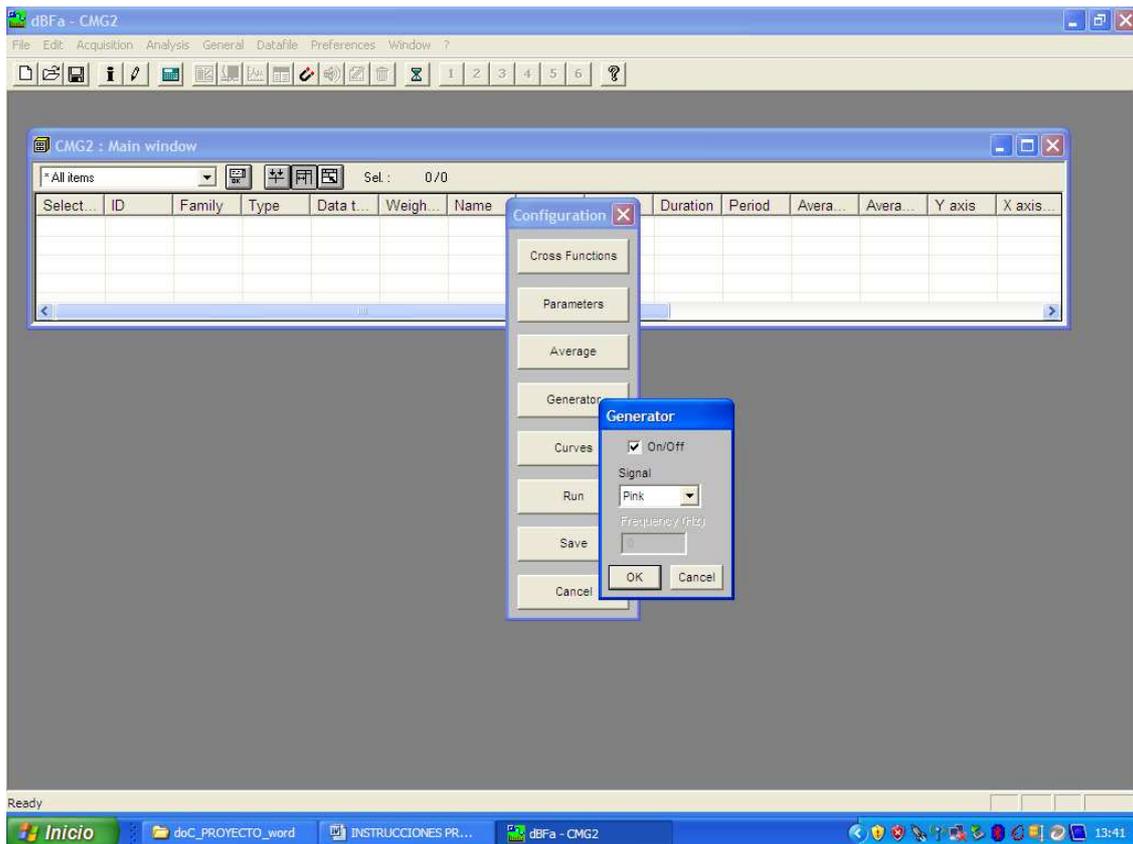


Figura 28

7. Por último, en la opción "average" se elige el tiempo de medida. Primero se pulsa la pestaña "Modify" y luego se introduce el tiempo, en nuestro caso 50 segundos por ejemplo, según la figura:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

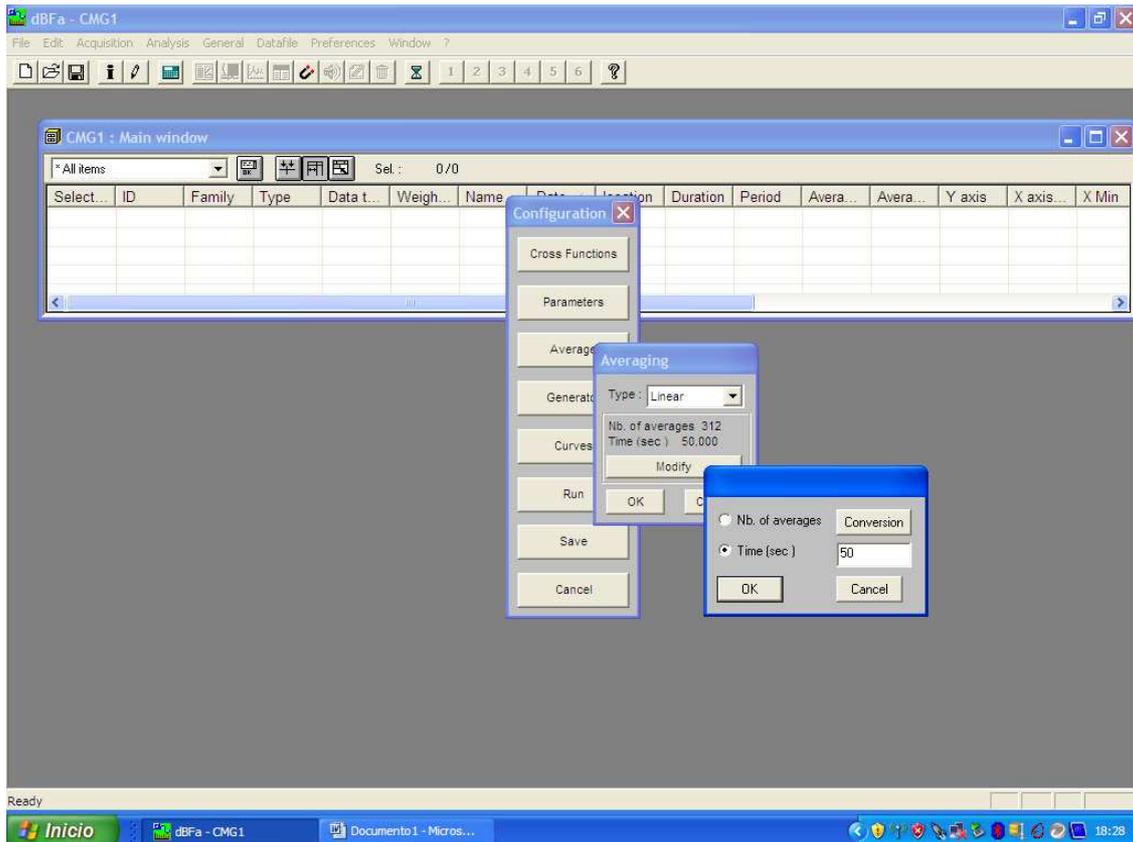


Figura 29

8. Ya sólo queda pulsar el botón de “Run” y aparece la ventana de medida para comenzar con el ensayo.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

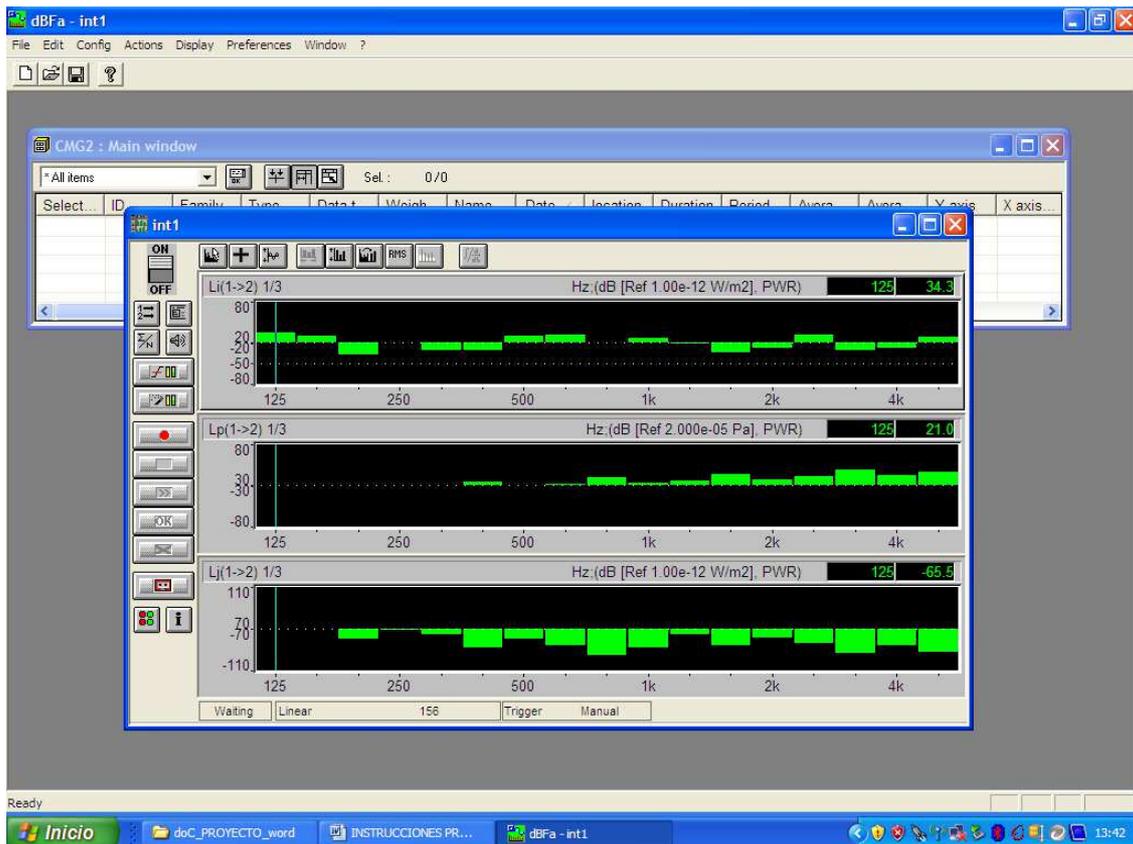


Figura 30

9. Una vez llegados a este punto el programa funciona igual que el dBBATI. Haciendo clic en "ok" aceptamos la medida, si no la rechazamos con el botón "x" y ya con las medidas aceptadas, se obtiene la representación para cada banda de octava o de tercio de octava de cada parámetro.

7.2.2 ISO 9614 SESSION

1. Al igual que antes se abre el programa, pero esta vez, al abrir un archivo nuevo se elige la opción de "ISO 9614 session":

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

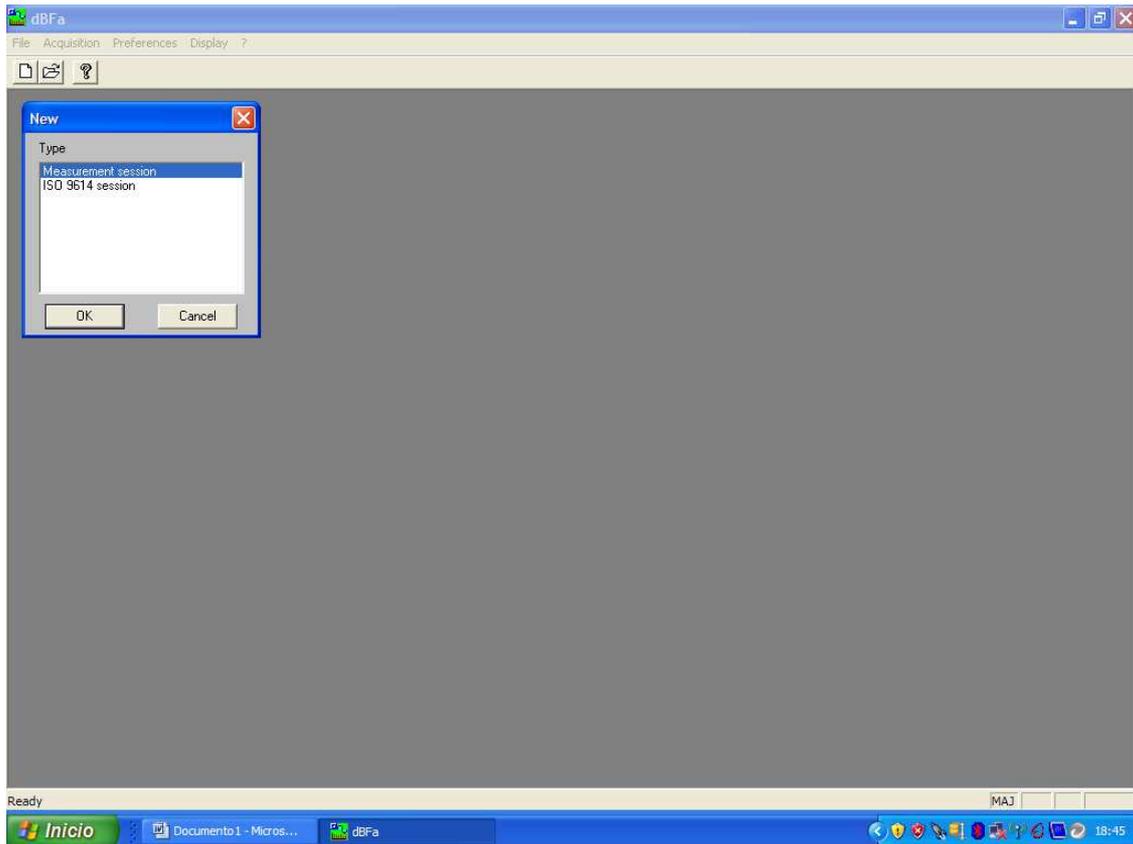


Figura 31

2. A continuación aparece la siguiente medida para elegir la forma de la superficie de medida (paralelepípedo o lista) y la forma de medida; por barrido (scanning) o por puntos:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

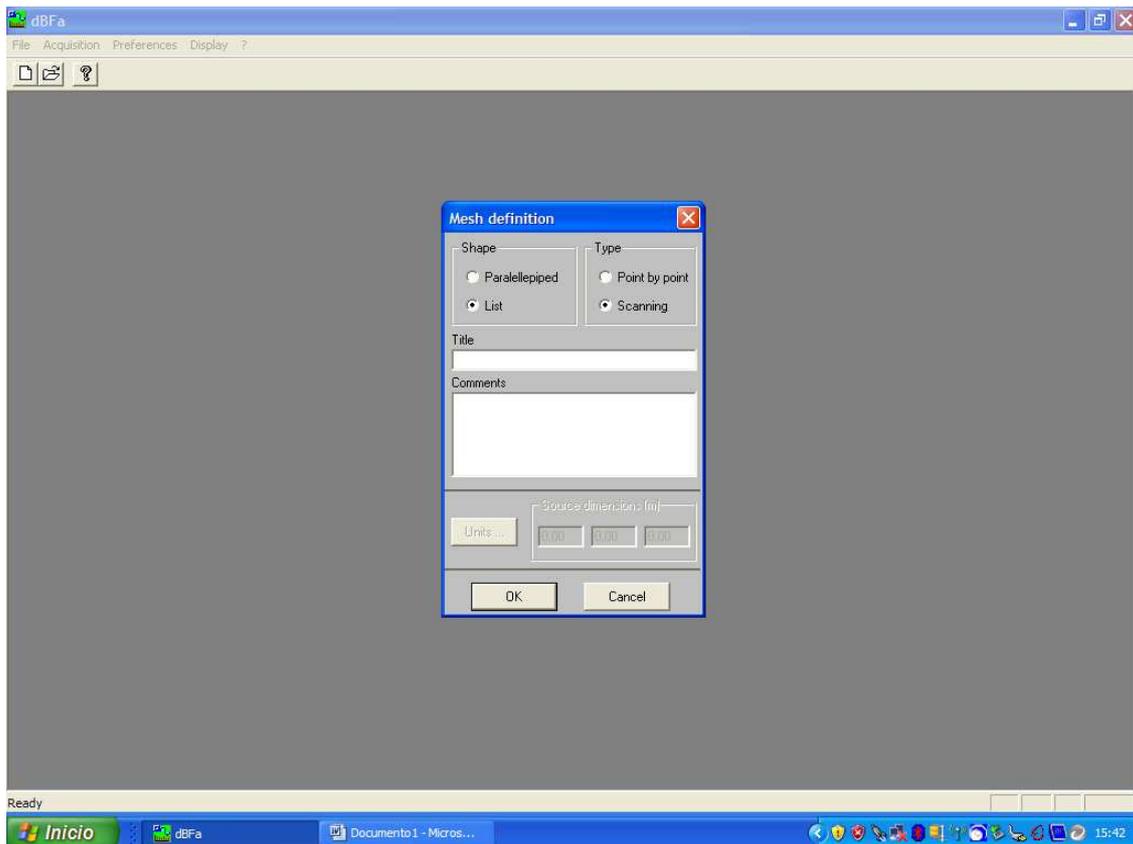


Figura 32

Se selecciona la opción de medida por barrido o por puntos según el ensayo en particular. Si se opta por la forma de la fuente de paralelepípedo el programa nos pedirá a continuación las medidas de dicho paralelepípedo.

En nuestro caso, se elige la opción de lista, para a continuación especificar las medidas de la pared sometida al ensayo de aislamiento.

3. Al aceptar, la siguiente ventana pide que numeremos las sub-áreas de medición y especifiquemos las dimensiones. Haciendo click en la pestaña de "Add" se van añadiendo sub-áreas.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

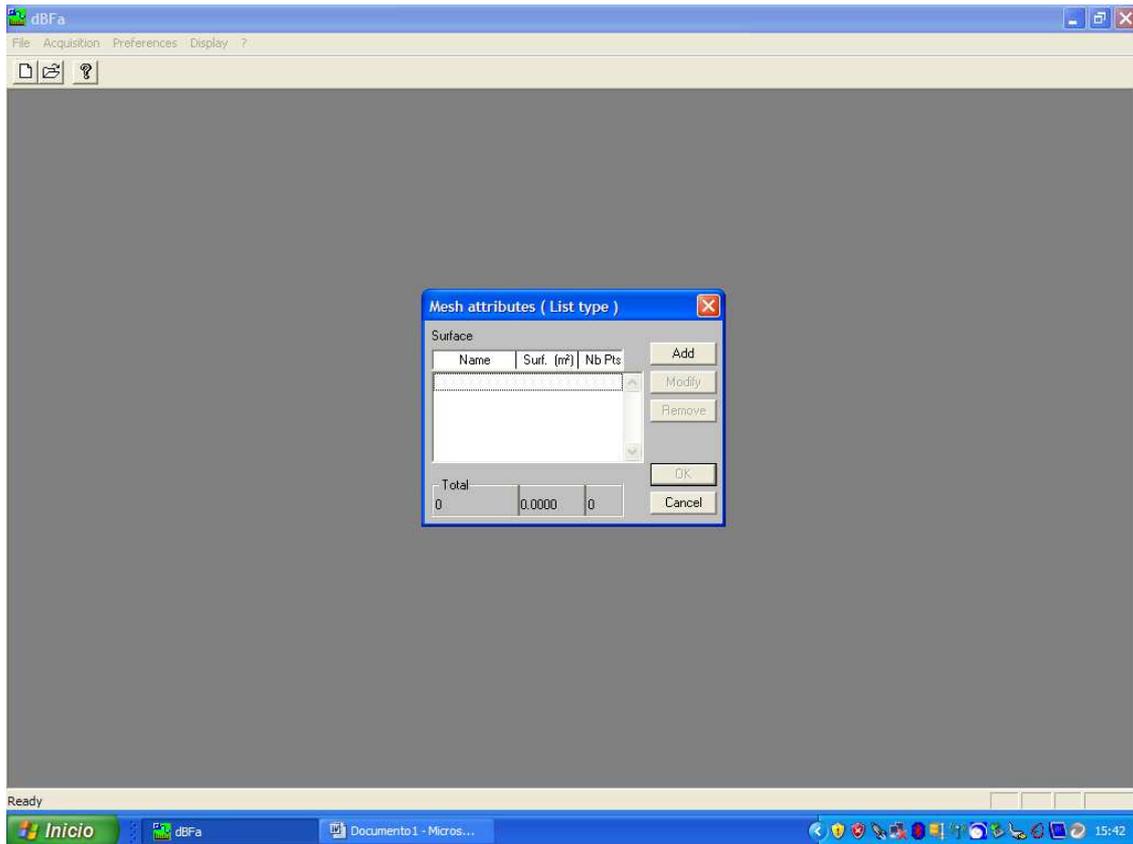


Figura 33

Haciendo click en la pestaña de "Add" se van añadiendo sub-áreas.

4. A continuación aparece una nueva sub-área para introducir las dimensiones y el número de mediciones por sub-área:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

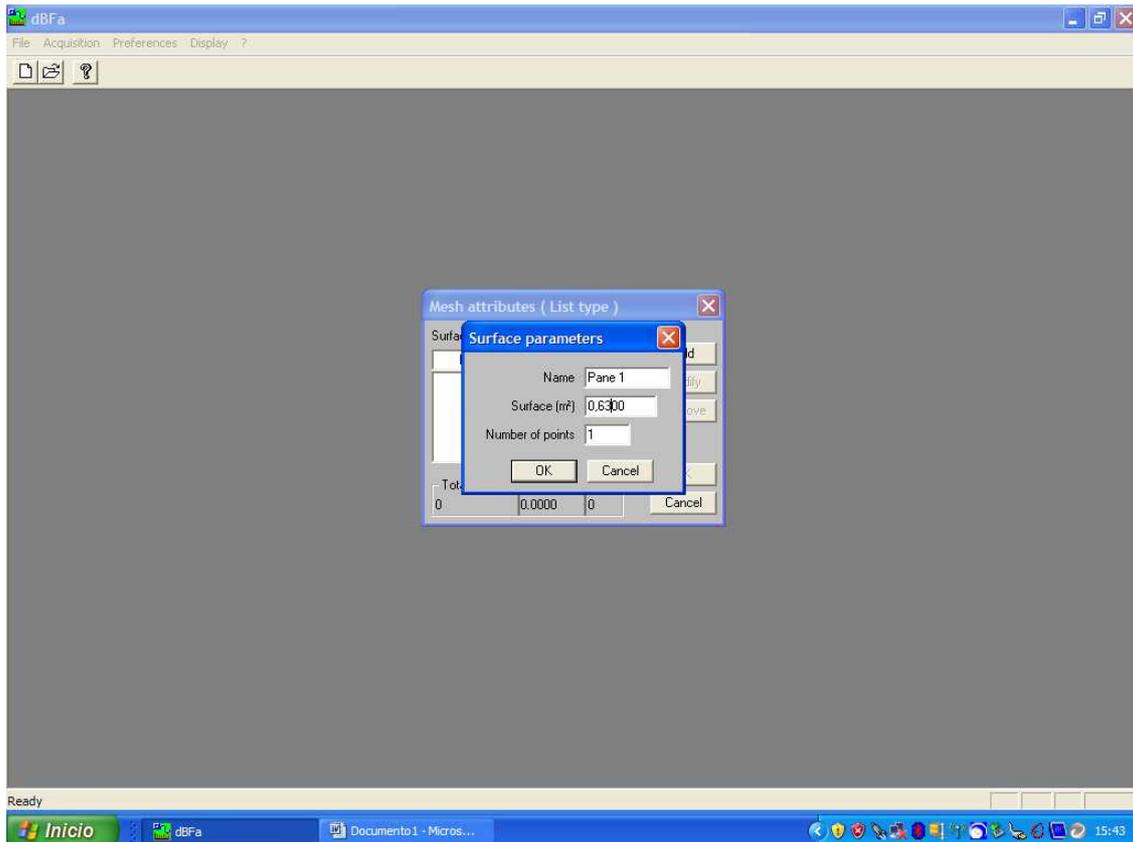


Figura 34

5. Una vez, llegados a este punto, haciendo click en aceptar nos aparece la siguiente ventana con los datos del ensayo: superficie total de medida, número de medidas...

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

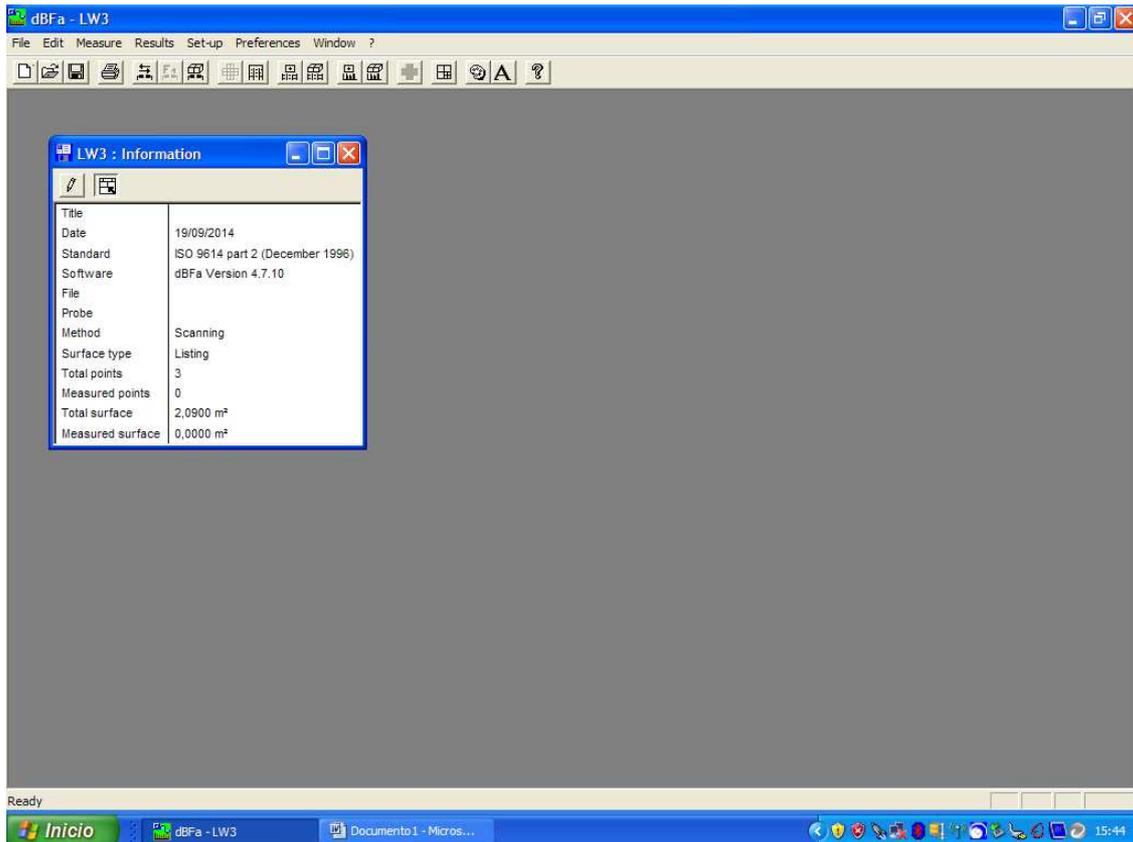


Figura 35

6. En este momento, se procede a comenzar con la realización del ensayo. Para ello, se hace click en "measure"

7. En la siguiente ventana se hace click en la pestaña señalada con la flecha roja para elegir el orden de las medidas:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

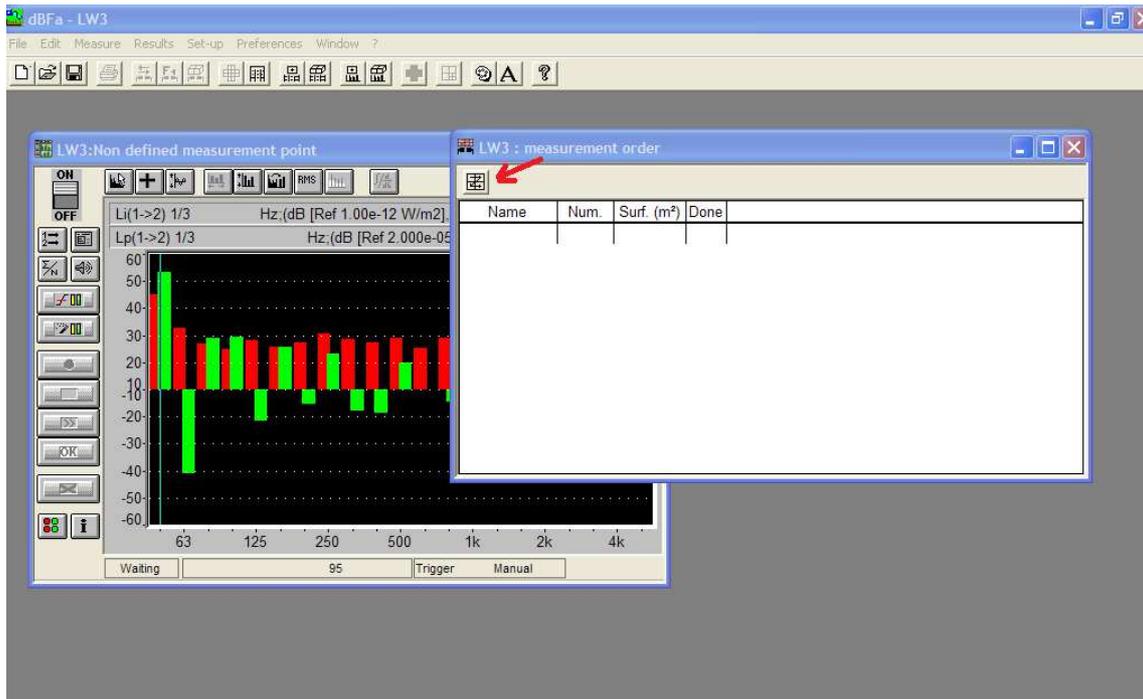
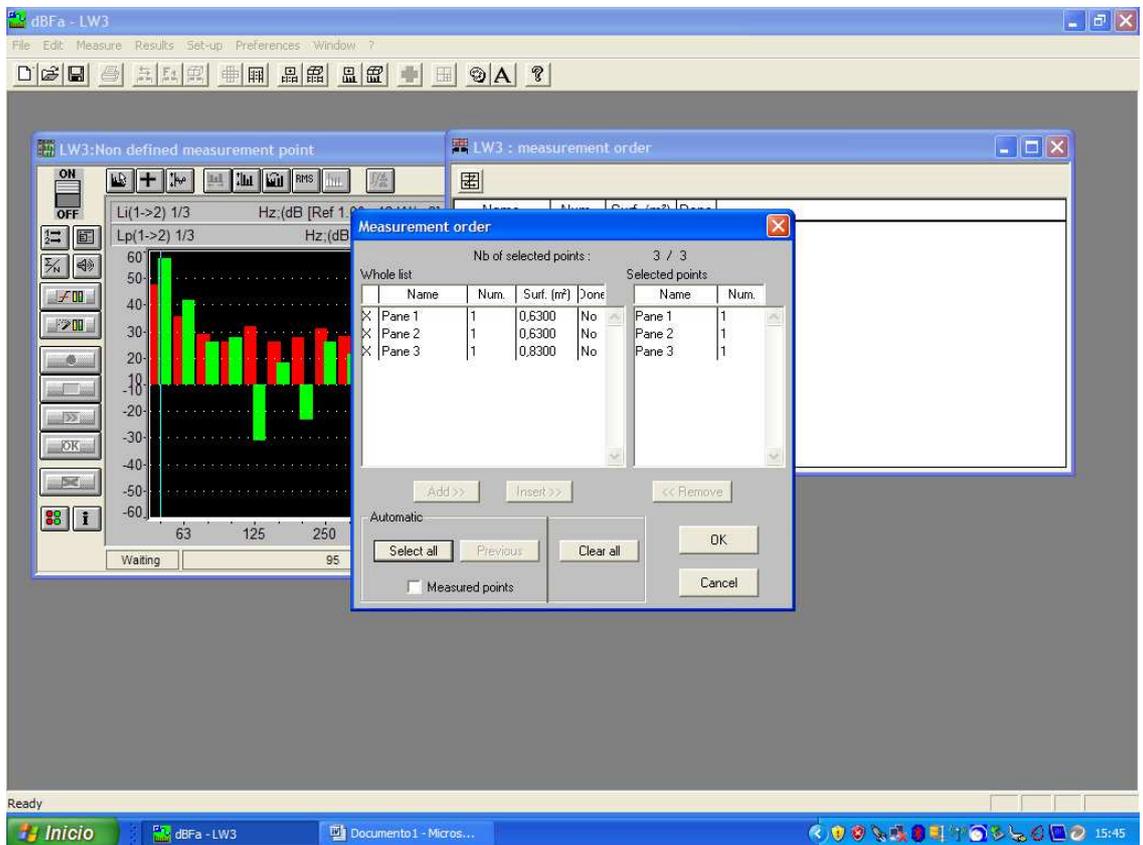


Figura 36

8. Nos aparecen las sub-áreas de medición que deseamos medir, en nuestro caso se seleccionan todas.



Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Figura 37

9. Cuando se acepta, se queda dicha ventana parpadeando en cada una de las medidas de cada sub-área que se esté realizando. Sin embargo, el usuario debe hacer click en la ventana negra de medida para ir realizando las pruebas.



Figura 38

10. Una vez llegados a este punto haciendo click en la pestaña de "config" se eligen las mismas opciones que en la "mesarument session" y las medidas se realizan de la misma forma que en el programa dBBATI.⁽²⁰⁾

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

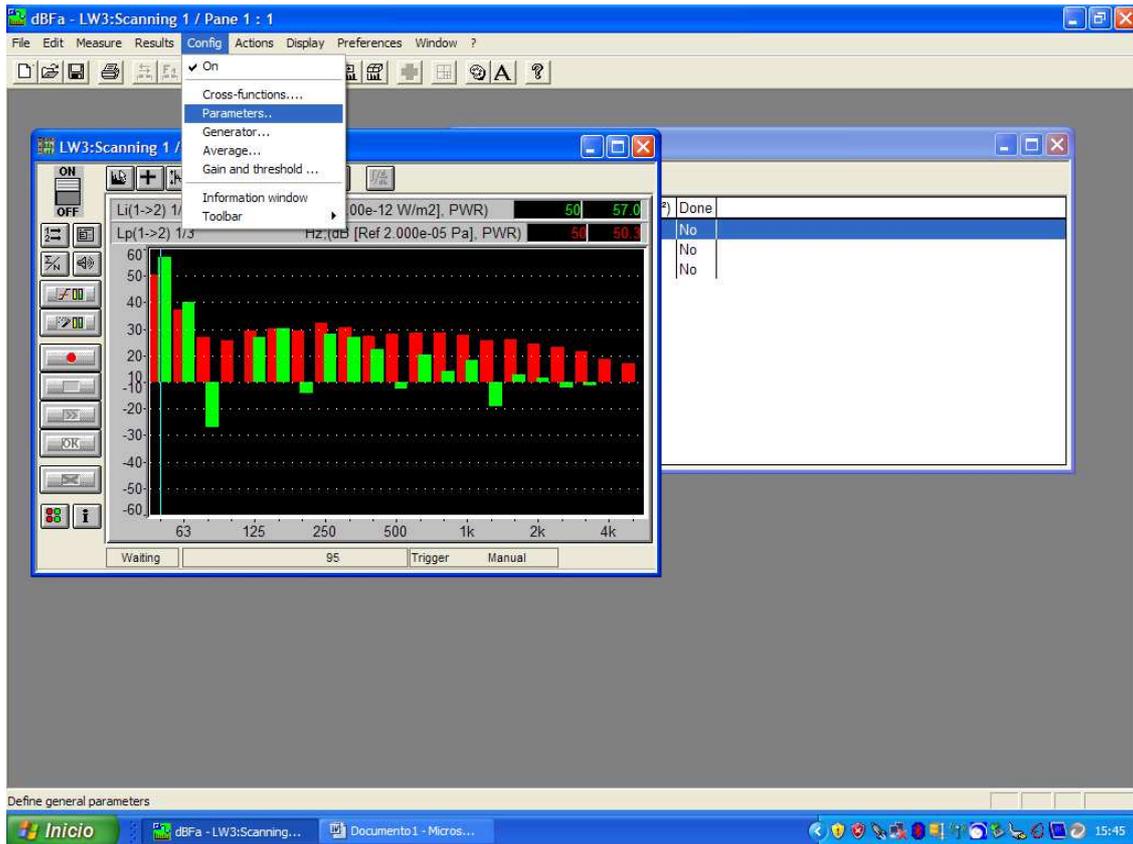


Figura 39

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

8. RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados numéricos obtenidos de los diferentes ensayos realizados a lo largo del proyecto.

En primer lugar se detallarán los resultados obtenidos del ensayo de aislamiento medido mediante presión. Siguiendo las directrices de la norma ISO-140-4. A continuación, se compararán estos resultados con los obtenidos realizando el mismo ensayo mediante intensimetría siguiendo las directrices de la norma ISO-15186.

Tras ello, se realizarán varios ensayos de aislamiento mediante intensimetría variando diferentes parámetros como la densidad y la distancia de barrido, el ruido de fondo... De esta forma, se evaluará la influencia de dichos parámetros en los resultados de las diferentes medidas de intensidad.

Las habitaciones receptora y emisora se muestran a continuación en las siguientes fotos:



Imagen 2. Sala receptora

La sala receptora, utilizada en el laboratorio como sala de café, presentaba una mesa en el centro con 4 sillas y una otra mesa detrás con algunos utensilios de cocina.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro



Imagen 3. Sala emisora

El pasillo del laboratorio de mecánica fue utilizado como sala emisora del ensayo, situándose la fuente sonora en el centro de la pared y a una distancia aproximada de 40 cm. El pasillo presenta unos 6 m de largo hasta la puerta de entrada aproximadamente. La dificultad de medir el tiempo de reverberación en una sala de dichas características obligó a elegirla como sala emisora en vez de como receptora. No obstante, en un ensayo se probó a intercambiar las salas para evaluar y comparar los diferentes resultados.

La pared que separa ambas habitaciones, es decir, la superficie de medición, está compuesta por tres superficies de aluminio y seis de vidrio, como puede apreciarse en la imagen 3. La presencia de diferentes materiales en la muestra de ensayo nos ayudará a la hora de evaluar sus características en lo que a protección del sonido se refiere, y a su vez, proporcionará facilidades para medir la intensidad en diferentes zonas de la superficie de medición.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

8.1 ENSAYO DE AISLAMIENTO MEDIANTE MEDIDAS DE PRESIÓN

En este ensayo se calculó el coeficiente de aislamiento, R, el aislamiento bruto, D y el tiempo de reverberación de la habitación receptora. Las ecuaciones utilizadas descritas en el apartado número cinco de procedimientos de medida fueron la 44 para restar el ruido de fondo, la 45 para el tiempo de reverberación y la 32 y la 33 para los coeficientes R y D. Los cálculos descritos en el apartado anterior fueron desarrollados por el software dBATI.

Los datos geométricos de la habitación sometida a ensayo (la sala receptora), necesarios para los cálculos son:

V (volumen de la sala) = 16 m³

Sp (superficie de la pared) = 6 m²

Tras realizar el ensayo, los datos proporcionados por el software (ruido de fondo, espectro de emisión y espectro de recepción) se presentan en la siguiente tabla:

f(HZ)	Lp1	Lp2	L2_fondo
125	76,7	67,6	33,2
160	77,6	64,8	32,4
200	81,5	65,1	50,6
250	81,7	65,4	52,9
315	79,1	65,1	41
400	79	63,2	34,7
500	76,6	59,6	34,7
630	75,2	58,8	31,5
800	73,9	56,2	33,2
1000	73,1	53,4	30,7
1250	70,6	53,1	30,5
1600	72,2	55,2	29,6
2000	70,9	54,8	28,3
2500	70	53,4	26
3150	68	51,9	24,2
4000	65,4	48,4	21,9

Tabla 4. Datos del ensayo de aislamiento con medidas de presión.

La ISO 140-4 exige que haya una diferencia entre el ruido de fondo y el recibido como mínimo de 10 dB, los datos de la tabla 4 corroboran dicho hecho, ya que la diferencia entre Lp2 y Lp2_fondo es mucho mayor de 10 dB. Puede observarse también, que a bajas frecuencias (200 y 250 Hz) el ruido de fondo tiene valores similares al ruido recibido, hecho por el cual, el programa no te permite calcular los coeficientes espectrales y el valor del aislamiento global. No obstante este último se calculará manualmente a continuación.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

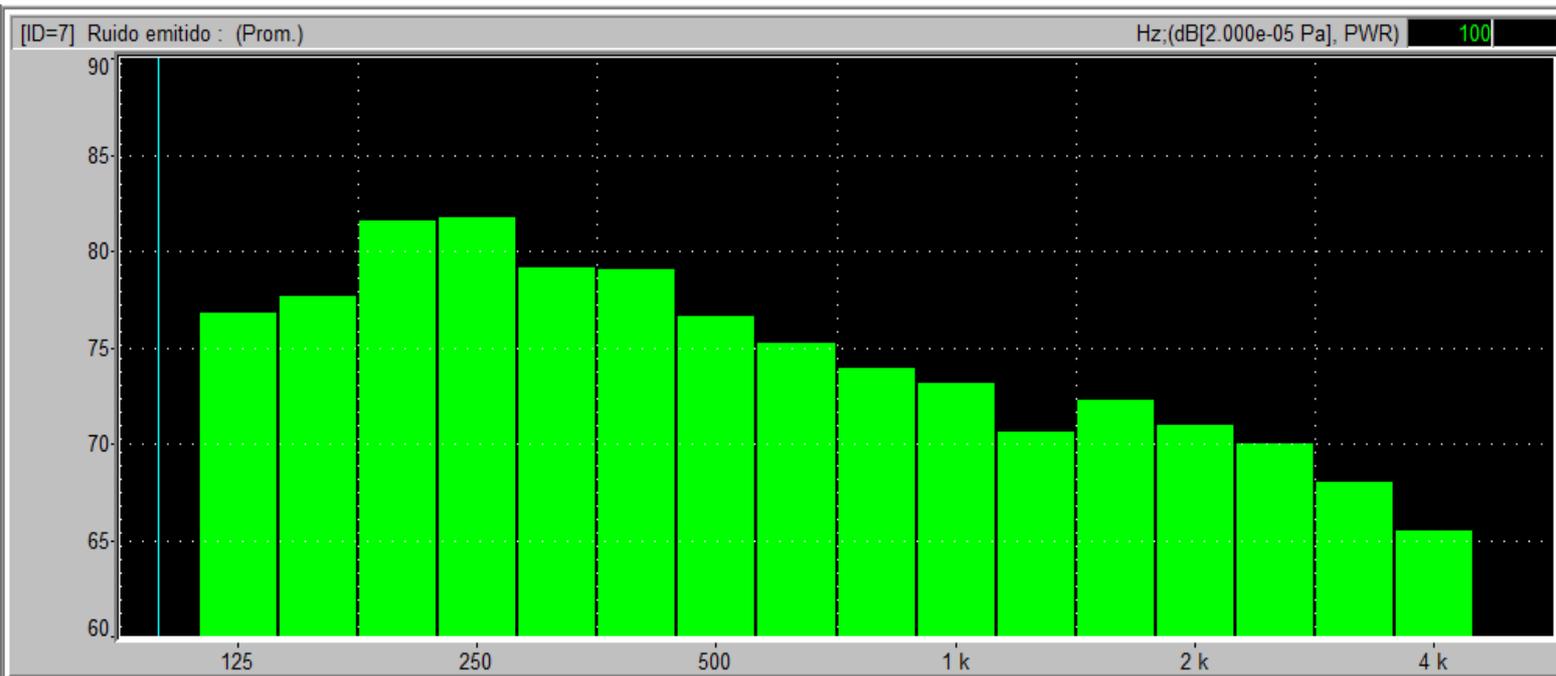


Figura 40. Espectro de emisión del ensayo de presión

Se comprueba también a continuación, como exige la norma que en la sala emisora no puede haber una diferencia mayor de 6 dB entre bandas contiguas. Esta condición puede apreciarse en el espectro de emisión obtenido:

Como se observa en la figura 36, la mayor diferencia se encuentra entre la banda de 160 y entre la de 200 Hz. Según los datos de la tabla número 4 la diferencia sería de unos 3,9 dB, por lo tanto seguiríamos cumpliendo los límites impuestos por la norma.

Los parámetros calculados se presentan en la siguiente tabla para diferentes bandas de frecuencia:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

f(HZ)	trev	D	R
125	0,7	9,2	9,4
160	0,49	12,7	15,5
200	0,52	16,4	16,5
250	0,47	16,3	17,9
315	0,61	14,1	15,3
400	0,46	15,8	15,9
500	0,62	17	17,9
630	0,43	16,4	17,4
800	0,5	17,7	19,5
1000	0,49	19,8	20,4
1250	0,41	17,5	18,7
1600	0,4	17	17,6
2000	0,41	16,1	17
2500	0,41	16,5	17,4
3150	0,43	16,1	16,8
4000	0,42	17	17,6

Tabla 5. Resultados del ensayo de aislamiento con medidas de presión.

Cabe destacar en la tabla anterior, el alto valor del tiempo de reverberación en la banda de 125 Hz. Para comprobar que no haya habido ningún fallo al realizar la medida, se observan las caídas graficadas por el programa en la siguiente figura:

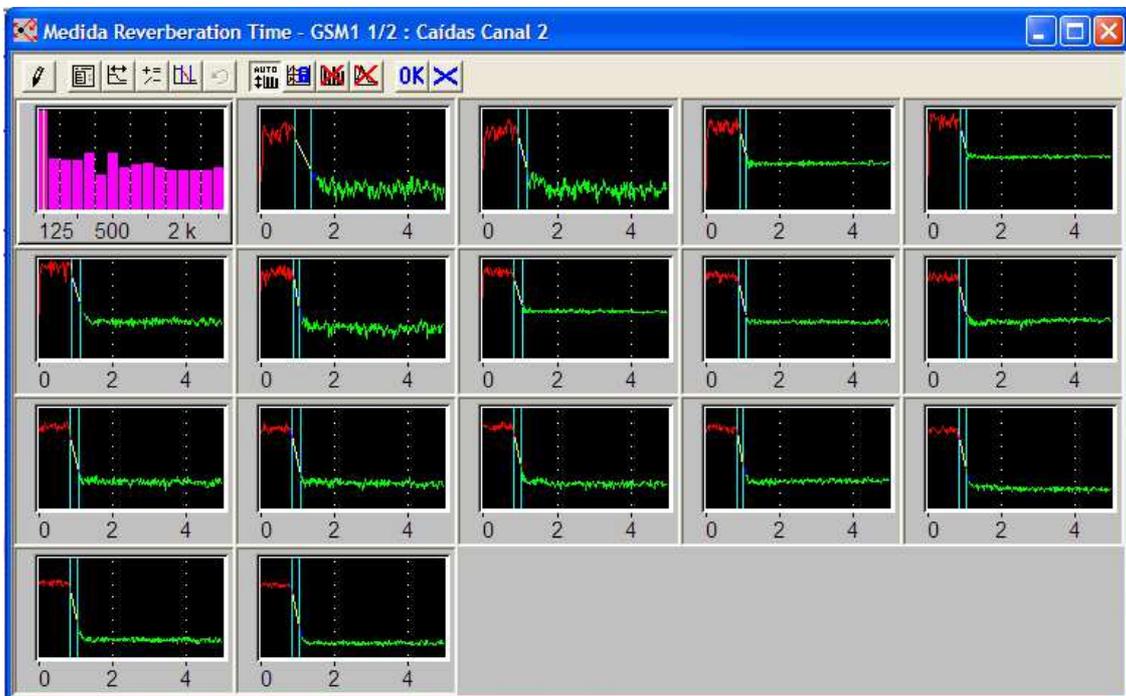


Figura 41. Caídas del tiempo de reverberación

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

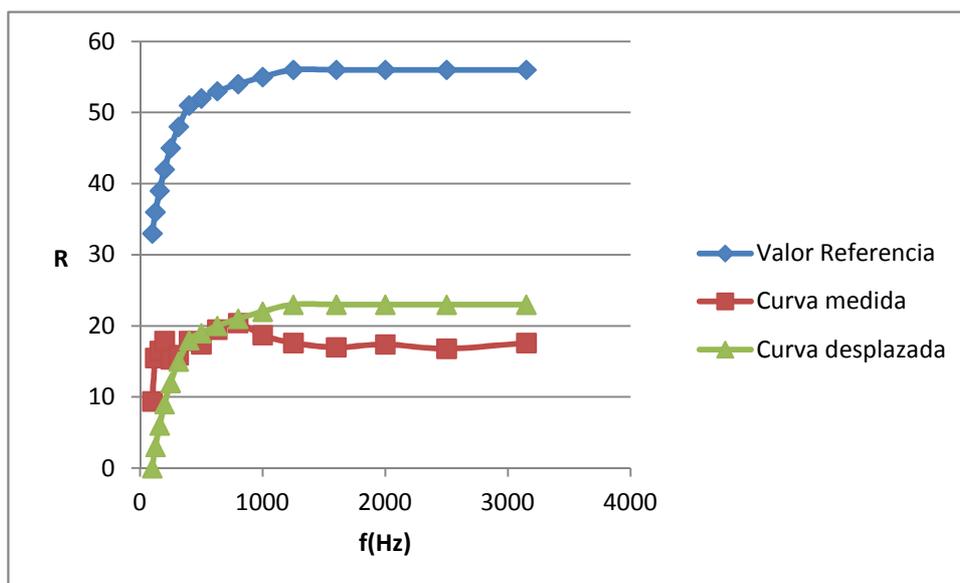
Puede observarse, pues, que las rectas de aproximación a las gráficas, tomadas por el programa, para todas las bandas de frecuencia son adecuadas, por lo que se toma como válidos los valores anteriores del tiempo de reverberación.

Seguidamente, se calcula el valor del área de absorción media (A_2) con la ecuación 28 del tiempo de reverberación. El valor del tiempo sería el reflejado en la tabla 5 a 1000 Hz de frecuencia. Con este valor y el del volumen de la habitación, se obtiene el resultado de área A_2 que sería:

$$A_2 = 5,12 \text{ m}^2$$

Por último ya se calcula el valor del aislamiento global (R_w). Para ello se realiza lo comentado en el apartado anterior de desplazar la curva de referencia en saltos de 1 dB hacia la curva medida hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo mayor posible, pero no mayor de 32 dB.

Realizando dicho cálculo, se obtiene que desplazando la curva de referencia 33 dB, la curva obtenida es la deseada. Se representan pues, en la siguiente gráfica el resultado:



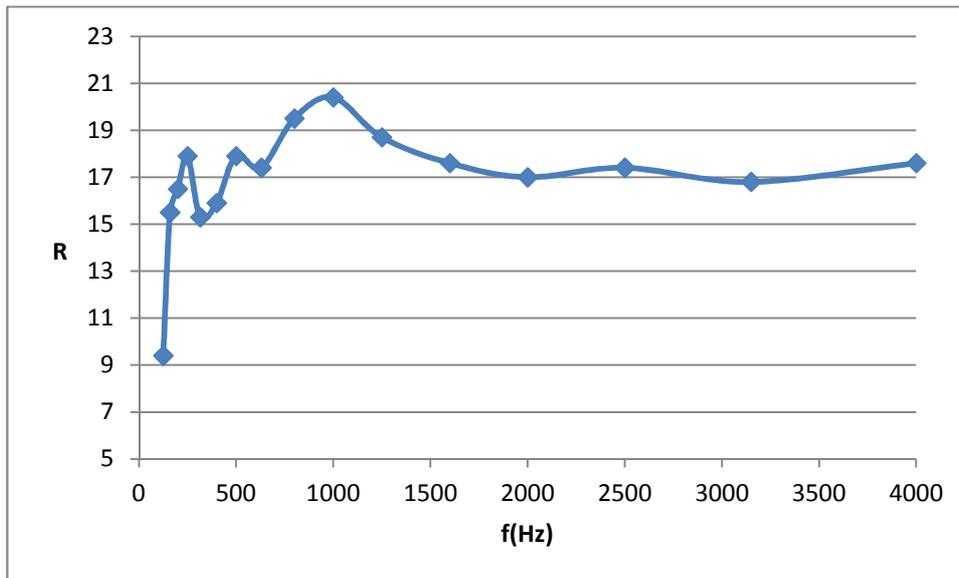
Gráfica 1. Cálculos del ensayo de presión

De tal forma, que se concluye con que el valor del aislamiento global, el valor de la curva de referencia a 500 Hz, sería de 19 dBA.

8.1.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para evaluar y analizar el resultado obtenido, se ha querido comparar la curva obtenida con la curva ideal según la ley de masas (figura 9) explicada en el primer apartado de teoría del proyecto. En la siguiente gráfica se representan los coeficientes de aislamiento del ensayo de presión por cada banda de frecuencia:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro



Gráfica 2. Gráfica del coeficiente de aislamiento del ensayo de presión

A simple vista, puede observarse la zona 1 (hasta 500 Hz) que describe la ley de masas, donde la pared de comporta como un muelle o placa vibrante. El aislamiento decae con la frecuencia y se ve afectado por las frecuencias propias o de resonancia. A continuación nos encontramos con la zona 2 (hasta 1000 Hz) en la cual, se cumple la ley de masas y la pared se comporta como una gran cantidad de pequeñas masas deslizando unas sobre otras. A partir de 1000 Hz parece que comienza la zona 3 ya que el aislamiento vuelve a decaer y la pared vuelve a comportarse como un resorte.

8.2 ENSAYOS DE AISLAMIENTO MEDIANTE MEDIDAS DE INTENSIDAD

8.2.1 ENSAYOS DE AISLAMIENTO EN LA PARED

Primeramente se realizaron varios ensayos por intensimetría variando diferentes parámetros de medida, para determinar la influencia de cada uno de ellos, así como comparar unos con otros y con el de presión realizado anteriormente. Para ello, se dividió la superficie de medida en 9 sub-áreas y se midió en las 6 inferiores numeradas en color rojo según la figura siguiente:

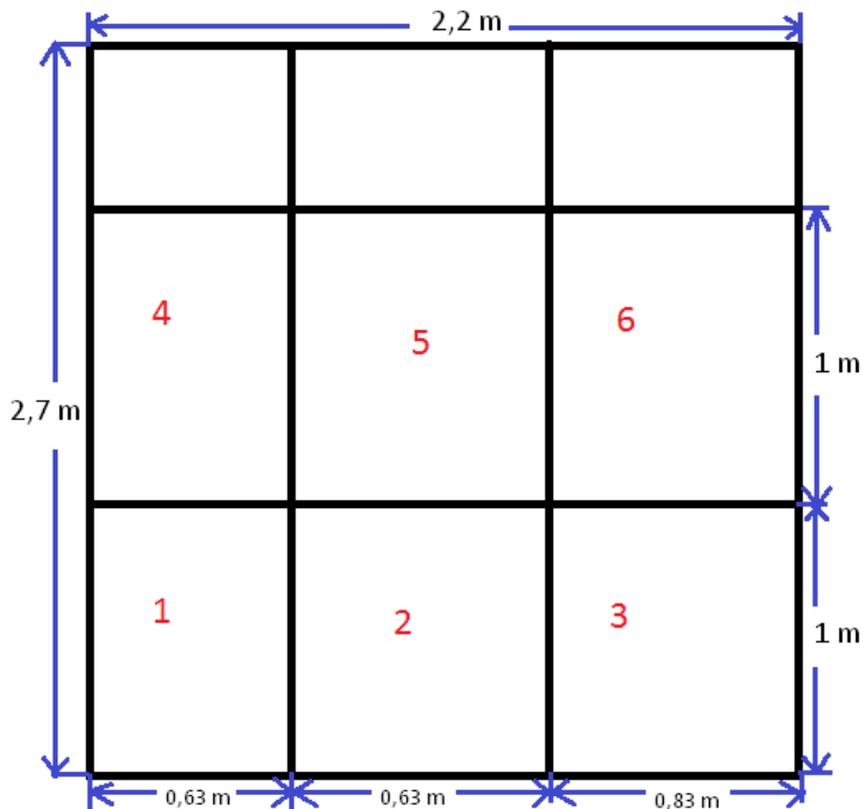


Figura 41. Sub-áreas de medición de la pared sometida a ensayo.

Si se observa la imagen 3 de la pared de medición, se observa que las sub-áreas 1, 2 y 3 son de aluminio y el resto son de vidrio.

En el primer ensayo realizado se midió en las 9 sub-áreas representadas en la figura 41, al obtenerse un resultado similar al medir sólo 6, el resto de ensayos se realizaron sólo con las 6 sub-áreas inferiores para simplificar la realización de los ensayos.

En dicha figura, también pueden apreciarse las diferentes longitudes de cada una de las sub-áreas. Las características de cada ensayo se describirán a continuación.

- Ensayo 1. Fue el ensayo adoptado inicialmente como base para comparar el resto de ensayos. Se realizó por barrido a una distancia de medida de la pared de 15 cm, realizando dos barridos (uno horizontal y otro vertical) en cada una de las 6 sub-áreas de medición.

-Ensayo 2. Este ensayo se realizó por puntos, midiendo en dos puntos diferentes en cada sub-área de medición. Los puntos se situaron en el centro de cada sub-área y se midió a una distancia media de 30 cm de la pared.

-Ensayo 3. Se midió, a diferencia del resto de ensayos en las 9-sub-áreas de medición por barrido y a una distancia de 30 cm de la superficie.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

- Ensayo 4. Este ensayo se realizó de forma similar el número 1 pero esta vez, se duplicó la distancia de medición a la pared de medida.

-Ensayo 5. Para este ensayo, se intercambiaron las habitaciones de medida, de tal forma que la habitación emisora fue la sala de café y la receptora el pasillo. Se midió la intensidad en la pared de medida, pero en el lado opuesto a los ensayos anteriores. La distancia de medición fue de 30 cm y se midió por barrido al igual que en el ensayo 1.

-Ensayo 6. Para el último de estos ensayos, se duplicó la densidad de barrido, de tal forma, que se dividió cada una de las sub-áreas de medición en 2 y se midió por barrido en cada una de estas 12 nuevas sub-áreas. Al igual que en el ensayo 1 se realizaron dos barridos por cada una de las ahora 12 nuevas sub-áreas y la distancia de medición se mantuvo en 30 cm.

En la siguiente tabla se resumen los ensayos comentados anteriormente según los diferentes parámetros de medición de cada uno de ellos:

ENSAYO	MEDICIÓN	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)	SUB-ÁREAS DE MEDICIÓN	HABITACIÓN EMISORA	HABITACIÓN RECEPTORA
1	BARRIDO	15	6	1	2
2	PUNTOS	30	6	1	2
3	BARRIDO	30	9	1	2
4	BARRIDO	30	6	1	2
5	BARRIDO	30	6	2	1
6	BARRIDO	30	12	1	2

Tabla 6. Parámetros de medición de los ensayos de aislamiento por intensimetría.

Se midieron los valores de presión e intensidad para cada una de las bandas en la habitación receptora y los de presión en la emisora. Al realizarse tantas mediciones en cada uno de los ensayos, se obtuvo una cantidad visceral de dato que no era viable presentar en el presente proyecto. Por ello se presentan a continuación los obtenidos únicamente en el ensayo 1 para ejemplificar el proceso. En la siguiente tabla se presentan los L_p y los L_i de la habitación emisora y los L_p de la receptora, así como los valores medios:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

f(Hz)	Li1	Li2	Li3	Li4	Li5	Li6	Li7	Li8	Li9	Li10	Li11	Li12	Lin
125	58,9	52,1	60,3	59,4	58,4	60,1	33,9	47,4	51,5	52,2	-40	-51,8	57,62
160	52	55,8	60,8	60,5	60,8	63,6	58,3	55,6	56,9	55,1	62,2	61,6	61,49
200	58,2	60,6	59,8	58,9	57,6	61,5	60	59,6	54	54,5	60,3	61	60,88
250	59,1	59	60,3	60,6	57,3	59,2	60	59,2	54,9	54,5	60,1	59,6	60,47
315	58,1	59,3	56,7	56,5	57,1	59,4	43,7	51,9	55,7	55,5	53	51,4	57,68
400	56,2	56,3	55,2	56,7	54,7	57,1	48,8	51,4	48,4	-43,7	55,2	55,4	56,10
500	49,5	50,5	52,1	51,1	51,5	54,1	51	50	52,7	51,4	50,5	51,1	52,96
630	49,2	47,9	50	50,5	51,2	53,1	49,5	49	46,3	46,1	51,3	50,3	51,58
800	45,6	44,9	47,5	49	47,8	51	44,5	45,1	41,7	45,5	45,8	47,1	48,52
1000	36,9	34,6	41	43,2	45,2	48,3	39,3	40,9	43,3	38,7	45,5	46	45,30
1250	36,2	39,4	41,2	40,4	42	46,2	33,3	31,8	37,2	38,6	47,4	47,6	44,64
1600	33	40,3	41,7	42	42,6	49,8	37,6	39	40,5	40,5	48,3	49	46,48
2000	39,9	32,2	39,1	35,7	41,9	50,3	29,6	37,8	40,1	41,2	43,5	45,4	44,84
2500	35,1	38	34,3	38,7	42,6	49,3	36,2	39,6	39,8	41,1	41,2	40,9	43,73
3150	35,9	37	39,2	39,8	42,4	47,2	36	36,4	38,1	39,2	40,2	39,9	42,48
4000	34,2	33,4	35,7	37,4	39,7	43,3	33,2	34,7	35,2	36,1	37	37,3	39,27
5000	33,6	34,5	34	34,8	38	41,3	31,5	32,1	32,7	31,9	34,4	34,3	37,23

Tabla 7. Valores de intensidad de la habitación emisora en el ensayo 1

f(Hz)	Lp1	Lp2	Lp3	Lp4	Lp5	Lp6	Lp7	Lp8	Lp9	Lp10	Lp11	Lp12	Lpn	Lp_hab_emisora
125	69	68	67	66,8	64,4	64,8	64,8	64,2	63,1	62,5	62,8	62,4	66,71	80,4
160	68	66	67	66,8	67,7	68,4	68,5	68,4	67,8	67,2	67	66,7	68,99	80
200	67	66	66	65,1	69,2	69,7	68,7	68,4	63,8	63,2	68,4	68,6	69,06	82
250	69	68	67	67	68,1	68,3	68,2	68,7	67,1	67,6	68,5	67,1	69,32	82,2
315	67	67	65	65,4	68	67,9	66,4	66	65,8	66,1	66,5	66,1	68,12	79,5
400	66	66	66	66,2	66,4	66,2	64,6	64,7	64,9	65,4	65,2	64,8	66,94	78
500	61	62	62	61,4	62,2	62,8	61,1	61,4	62	62	60,9	61,3	63,14	72,3
630	60	59	60	59,5	59,9	60,8	59,1	60,2	59,1	59,5	59,5	59,9	61,22	72,8
800	57	56	58	57,2	58,5	58,5	57,7	57,4	56,9	57,1	57	57,5	58,91	72,5
1000	54	54	55	55,1	56,7	56,5	54,9	54,9	54,8	54,5	55,8	55,8	56,81	72
1250	53	53	54	54	55	55,3	53,7	53,7	54,1	53,7	55,5	55,4	55,83	70,4
1600	56	56	56	56,3	57,9	58,3	55,9	56,1	56,6	56,7	57,7	57,9	58,43	72,9
2000	55	55	56	55,2	57	58	55,1	55,1	55,4	55,6	55,9	56	57,38	71,3
2500	54	54	55	54,8	56,4	57	54,4	54,3	54,5	54,6	54,7	54,7	56,51	70,5
3150	52	52	53	53	54,2	55	52,3	52,4	52,4	52,4	52,6	52,5	54,46	69,6
4000	49	49	50	49,5	50,4	51,3	48,5	48,6	48,8	48,8	49,1	48,9	50,88	67,2
5000	47	47	47	47,4	48,8	49,5	46,3	46,4	46,6	46,5	47,2	47,1	48,94	65,9

Tabla 8. Valores de presión de la habitación receptora y emisora en el ensayo 1

Los valores Lpt y Lit son los valores medios calculados con la ecuación 43 y Lp_hab_emisora corresponde a los valores de presión en la habitación emisora necesarios para el cálculo del coeficiente de aislamiento R.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

La norma no especifica nada acerca de restar el ruido de fondo a las medidas, en caso contrario al ensayo de presión. Los L_{pn} y L_{in} son valores medios promediados tanto espacialmente como temporalmente calculados a partir de la ecuación 39:

$$L_{in} = 10 \log \left[\frac{1}{S_m} \sum_i^N S_{m,i} 10^{0,1L_{mi}} \right]$$

Para cada uno de los ensayos se evaluó el parámetro R de aislamiento para cada una de las bandas de frecuencia, al igual que en el ensayo anterior. Se siguieron los procedimientos de cálculos descritos en apartados anteriores. Con la ecuación 43 se calculó un valor medio de intensidad para cada una de las bandas en la sala receptora e introduciendo los valores de presión en la sala emisora en la ecuación 49 se obtuvieron los valores de los coeficientes R de aislamiento. Los resultados del parámetro R pueden observarse en la siguiente tabla:

f(Hz)	ENSAYO1	ENSAYO2	ENSAYO3	ENSAYO4	ENSAYO5	ENSAYO6
125	11,51	12,21	7,63	7,35	10,6	10,87
160	8,54	11,02	7,52	6,21	6,98	8,14
200	13,05	16,91	12,29	10,57	10,38	11,95
250	13,66	17,16	13,99	12,23	13,21	13
315	13,85	17,17	13,60	12,34	12,16	13,11
400	15,33	21,86	14,16	13,25	12,84	15,53
500	16,07	21,16	14,71	12,81	13,41	14,74
630	16,05	20,96	15,61	13,78	15,65	16
800	17,82	20,73	16,71	14,88	15,89	16,72
1000	20,23	21,52	17,64	15,73	16,62	18,94
1250	18,39	19,41	15,87	13,56	15,11	16,49
1600	18,15	21,2	15,42	13,42	15,43	16,99
2000	18,49	19,98	14,56	12,86	14,82	16,39
2500	18,7	22,88	14,62	12,87	14,71	16,4
3150	17,95	23,85	15,07	13,40	15,28	16,17
4000	18,56	23,82	16,67	14,61	16,13	17,55

Tabla 9. Coeficientes R de aislamiento de los ensayos por intensimetría.

A continuación, para evaluar si el entorno es satisfactorio, se calculó el indicador de presión-intensidad (F_{pin}) con la ecuación número 33, así como el valor del índice residual con los valores tabulados en la tabla 3, aplicando la corrección oportuna para el separador de 18 mm usado en los ensayos. Los valores de dicho coeficiente para cada banda de frecuencia resultaron los siguientes:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

f(Hz)	δ_{p10}
125	15,57
160	16,57
200	17,57
250	18,57
315	18,57
400	18,57
500	18,57
630	18,57
800	18,57
1000	18,57
1250	18,57
1600	18,57
2000	18,57
2500	18,57
3150	18,57
4000	18,57
5000	18,57

Tabla 10. Índices de intensidad-presión residual.

Una vez calculados estos índices, según las características de la sala, es necesario comprobar si se cumple la siguiente condición:

$$F_{pIN} < \delta_{p10} - 7 \text{ dB} \quad (\text{Condición 1})$$

Los valores de los indicadores de presión-intensidad, se calculan con la ecuación 51, de tal forma que los resultados por cada ensayo fueron los siguientes:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

f(Hz)	ENSAYO1	ENSAYO2	ENSAYO3	ENSAYO4	ENSAYO5	ENSAYO6
125	9,09	10,01	5,91	5,61	5,62	10,22
160	7,50	10,26	6,83	6,53	6,65	6,85
200	8,17	12,20	6,43	6,08	6,81	7,45
250	8,85	13,46	8,57	8,27	6,88	9,15
315	10,43	11,50	9,30	9,00	8,59	9,38
400	10,83	15,16	7,78	7,48	7,94	9,87
500	10,18	15,07	8,52	8,22	8,79	8,62
630	9,64	13,98	8,41	8,11	8,70	8,43
800	10,39	12,25	8,39	8,09	8,46	8,54
1000	11,51	12,28	8,14	8,02	7,79	9,47
1250	11,19	12,37	7,67	7,37	7,50	9,31
1600	11,95	14,22	7,97	7,67	7,97	9,85
2000	12,53	13,45	8,32	8,02	8,43	10,06
2500	12,77	16,09	8,53	7,97	8,61	10,08
3150	11,98	17,15	8,91	8,61	9,11	10,15
4000	11,60	16,08	9,12	8,72	9,08	10,14
5000	11,71	16,28	9,70	9,37	9,14	10,44

Tabla 11. Factores de presión-intensidad de los ensayos por intensimetría.

Se han representado en color rojo los valores que no cumplen la condición 1 y en verde los que sí la cumplen.

El factor de presión-intensidad proporciona una estimación de la calidad del entorno de medición, si la condición 1 vista con anterioridad no se cumple, a priori los resultados obtenidos en el ensayo no son fiables, por lo que no se pueden comparar con los de otros ensayos. Por tanto, a la vista de los datos de la tabla 11, parece lógico suponer que el ensayo 1 tomado como referencia, no ofrecerá buenos resultados, por lo que en lugar de ello, se ha tomado el ensayo número 4 con mayor distancia de medición, como ensayo de referencia.

Por último, antes de poder comparar los valores del coeficiente de aislamiento de los diferentes ensayos de intensidad con el obtenido por presión, será necesario aplicar la corrección de Waterhouse para bajas frecuencias.

Aplicando la ecuación 42, para los valores de la sala sometida a ensayo (volumen y superficie de medición) se obtuvieron los siguientes valores para las distintas bandas de frecuencia:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

f(Hz)	Kc
50	0,00284912
63	0,00226136
80	0,00178092
100	0,0014248
125	0,00113987
160	0,00089055
200	0,00071246
250	0,00056997
315	0,00045237
400	0,00035624
500	0,000285
630	0,00022619
800	0,00017812
1000	0,0001425
1250	0,000114
1600	8,9063E-05
2000	7,1251E-05
2500	5,7001E-05
3150	4,5239E-05
4000	3,5626E-05
5000	2,85E-05

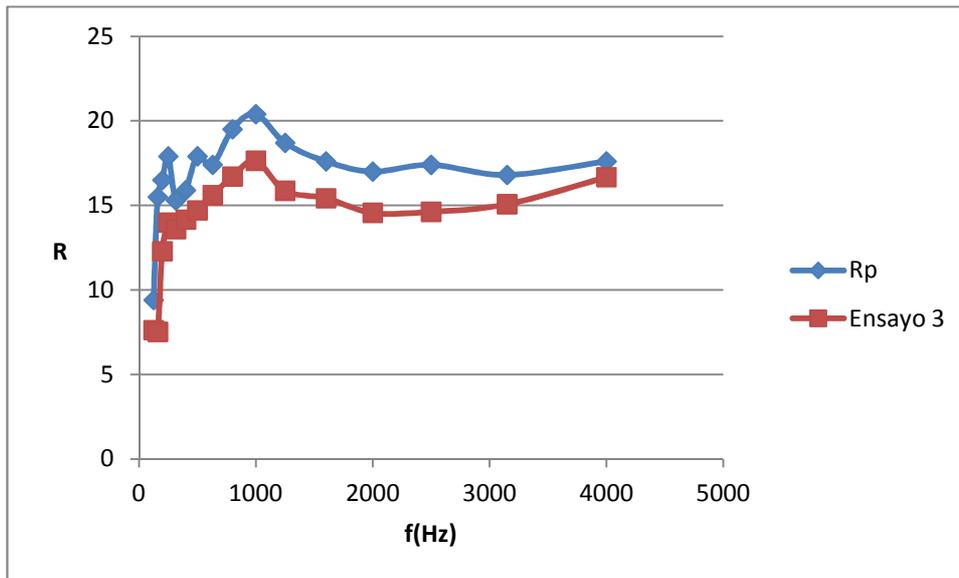
Tabla 12. Coeficientes de corrección de Waterhouse

Como puede observarse en la tabla, los valores de estos coeficientes tienen un valor muy bajo por lo que se despreciaron a la hora de realizar los cálculos.

8.2.1.1 Evaluación del método de medida.

Se compara previamente los resultados obtenidos con el ensayo de medidas de presión y el de medidas de intensidad del ensayo 3 (con las nueve sub-áreas de medición). En la siguiente gráfica pueden verse los valores del coeficiente de aislamiento de ambos métodos:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro



Gráfica 3. Comparación de los resultados obtenidos por presión y por intensidad del ensayo 3

Donde:

Rp: Coeficientes de aislamiento obtenidos mediante el método de presión.

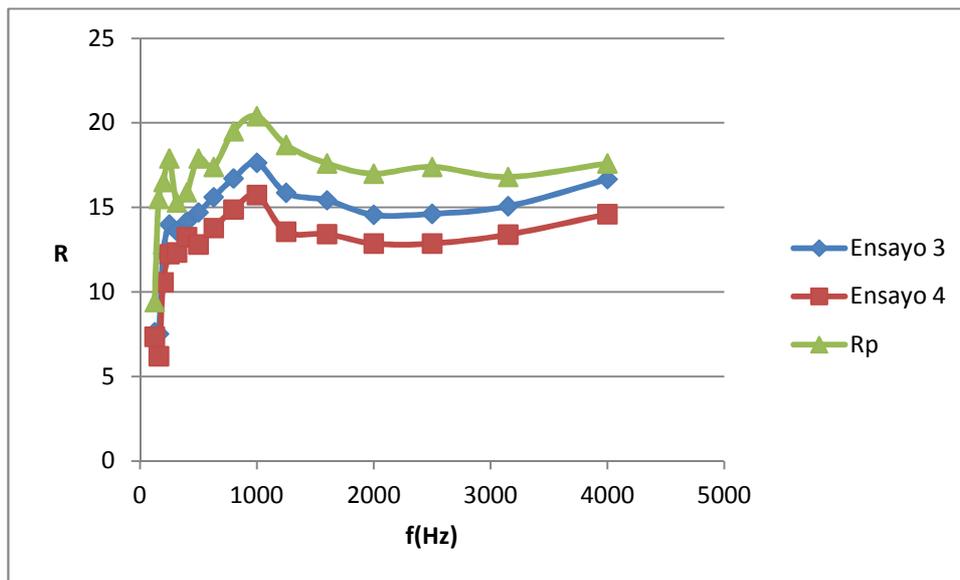
A simple vista, según los datos obtenidos, puede afirmarse que los resultados de ambos métodos gozan de amplias similitudes.

Ambas curvas siguen una tendencia muy similar, salvo que la de presión se desplaza 2 dB aproximadamente por encima de la curva de intensidad.

8.2.1.2 Evaluación del número de sub-áreas medidas

Se comparan a continuación los ensayos 3 y 4 para comprobar que, como se afirmó con anterioridad, los resultados son similares y no es necesario medir en todas y cada una de las sub-áreas:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

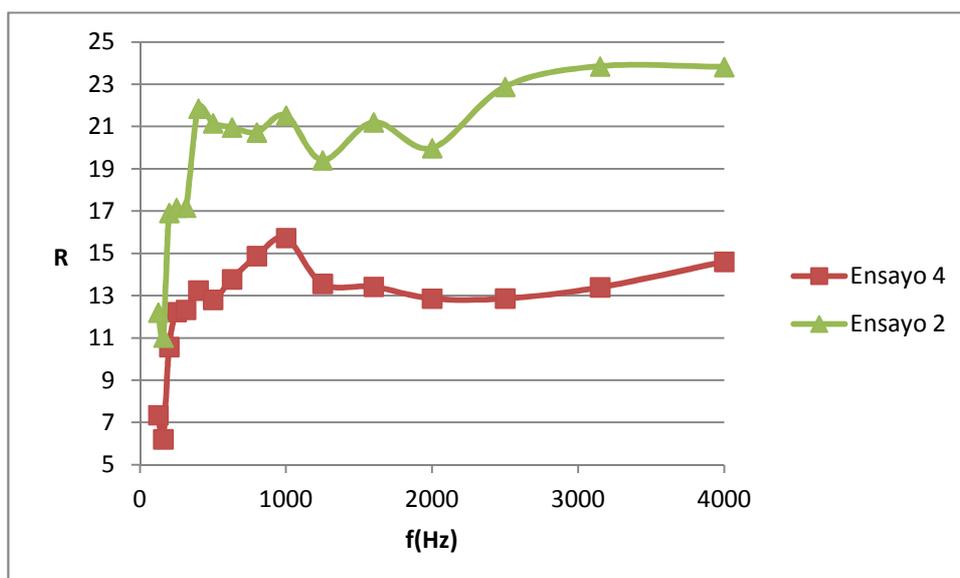


Gráfica 4. Comparación de los resultados obtenidos por presión y en los ensayos 3 y 4

Se observa claramente, que los ensayos 3 y 4 son muy similares, lo cual, se pareció también en los resultados numéricos de la tabla 9. Además si se comparan con el de presión, puede observarse como es lógico, que los valores del ensayo 3, al medir en la habitación completa son más parecidos a los de presión que los del ensayo 4. Ambos métodos, según la tabla 10, cumplen a la perfección la condición del factor presión-intensidad para todas y cada una de las bandas de frecuencia.

8.2.1.3 Evaluación del método de medida de intensidad

En la siguiente gráfica se comparan los ensayos 4 y 2. El primero realizado por barrido y el segundo por puntos, manteniendo estables otros parámetros como la densidad de barrido.



Gráfica 5. Comparación de los resultados obtenidos por medición por puntos y por barrido.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

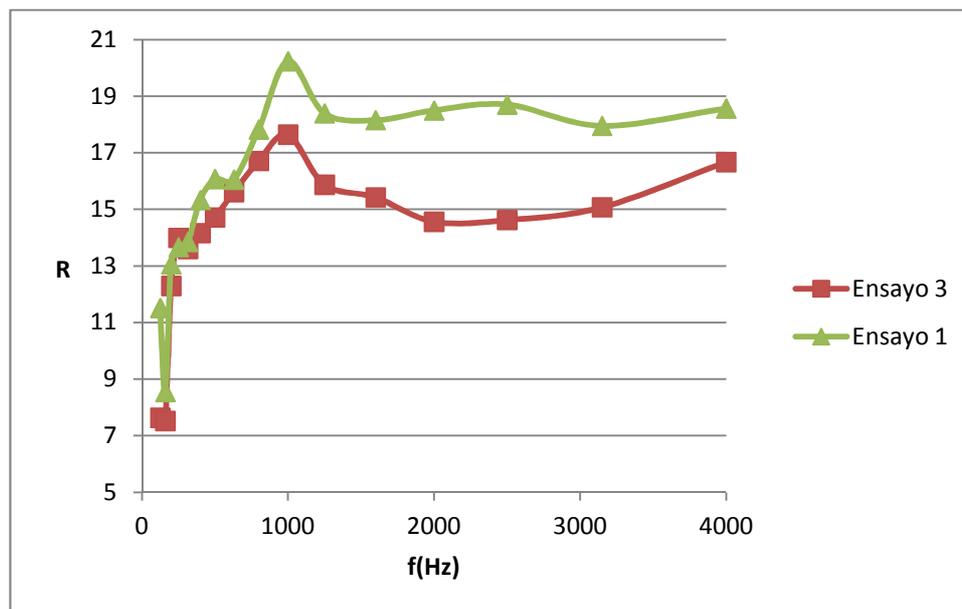
En general los resultados obtenidos por ambos métodos muestran pocas similitudes, las curvas apenas siguen una tendencia parecida. Refiriéndonos de nuevo a la tabla 11, está claro que el ensayo 2 posee muchos errores al no cumplirse la condición del factor presión-intensidad para casi ninguna de las bandas de tercios de octava. Sería necesario también mejorar el entorno acústico y la norma aconseja también mejorar el ensayo aumentando la discretización, es decir, tomando más puntos de medida.

En la bibliografía consultada también se comenta que la medición por puntos resulta complicada debido a una forma muy compleja del campo cercano a la superficie. Además, es muy fácil cometer errores por la persona que realiza el ensayo ya que se requiere la posición exacta de los micrófonos, siendo éstos muy sensibles a la distancia de medición. ⁽¹²⁾

Los resultados del ensayo 4 parecen ser más fiables en este caso, al ser más similares a los del método de presión y cumplirse la condición del factor de presión-intensidad.

8.2.1.4 Evaluación de la distancia de medida

En este punto se presenta la comparación de los ensayos 1 y 4, los cuales, se realizaron de la misma forma, salvo porque en el número 4 se incrementó la distancia de medida a la pared.



Gráfica 6. Comparación de los resultados obtenidos al incrementar la distancia de barrido.

Según la gráfica, parece que ambas curvas siguen una tendencia muy similar, salvo que la curva del ensayo 1 se desplaza al altas frecuencias unos 4 dB aproximadamente por encima de la del ensayo 3.

Según la teoría, la distancia de medida a la pared debe ser elegida atendiendo a un compromiso para evitar errores en el campo cercano y a su vez, minimizar la influencia del campo reverberante en la habitación receptora. ⁽¹²⁾ Según la norma 15186-2 si no se cumple la condición 1 para algunas bandas de frecuencia, como es el caso del ensayo 1, lo cual se

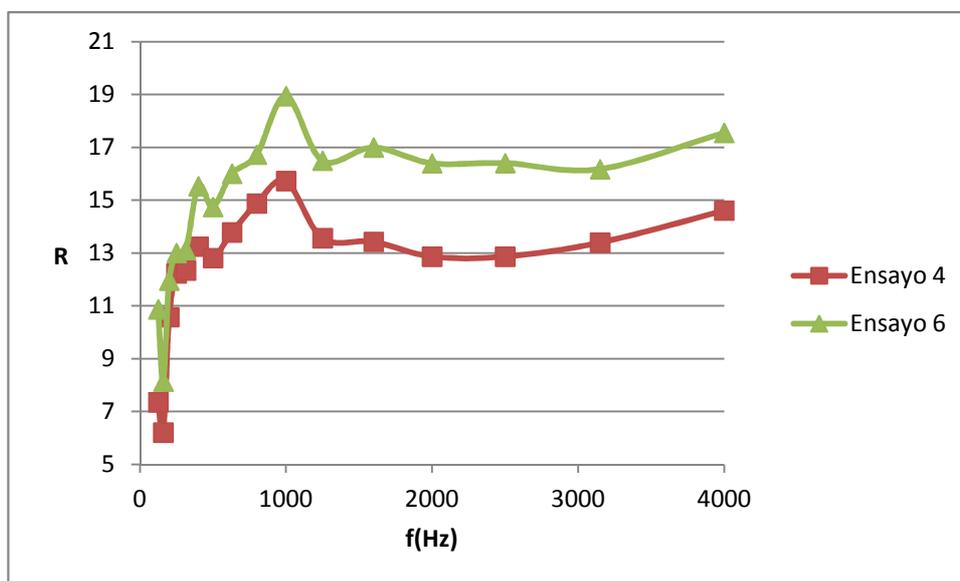
Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

observa en la tabla 11, el hecho de incrementar la distancia de medición podría ser una solución al problema.⁽²¹⁾ Lo cual, se cumple a la perfección, al incrementar la distancia de medición en el ensayo 3 se han eliminado estos errores, puesto que, según los datos de la tabla 11 se cumple la condición de la norma para todas las bandas de frecuencia. Sin embargo, en el ensayo 4 los coeficientes de aislamiento son menores, por lo que quizá hubiera sido necesario realizar otro ensayo incrementando la distancia de medida un poco pero sin llegar a duplicarla para comprobar así si se mejoraría el ensayo sin disminuir tanto los coeficientes de aislamiento.

La norma también afirma que puede mejorarse el entorno acústico con elementos absorbentes que eliminen ruido adicional que perjudique a la medida de la sonda. Este ruido adicional puede crear condiciones de medición inaceptables. Sin embargo, en los ensayos no se contaba con elementos absorbentes adecuados que no complicaran en exceso la realización de las medidas, por lo que se optó simplemente por aumentar la distancia de medición.

8.2.1.5 Influencia de la densidad de barrido

La comparación de los resultados obtenidos en los ensayos 4 y 5 se presenta a continuación en la gráfica. Se pretende, ahora evaluar la influencia en el ensayo de la densidad de barrido:



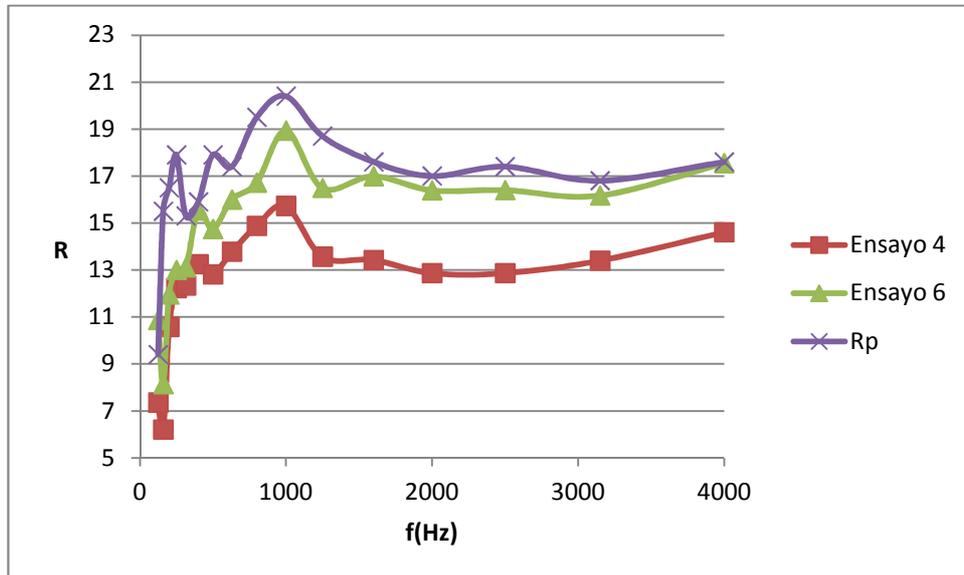
Gráfica 7. Comparación de los resultados obtenidos al incrementar la densidad de barrido.

Esta vez, las gráficas presentan mayores similitudes que anteriormente. Las tendencias son muy similares, estando una ligeramente desplazada de la otra. Además a bajas frecuencias los valores de los coeficientes de aislamiento son extremadamente parecidos.

Desde el punto de vista del factor presión-intensidad, ambos ensayos cumplieron a la perfección la condición 1 para cada una de las bandas, con lo cual, se comparan ahora ambas

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

curvas con la de presión para arrojar nuevos factores que ayuden a evaluar la influencia de la densidad de barrido:



Gráfica 8. Comparación de los resultados obtenidos en el ensayo 4 y 6 y el de presión

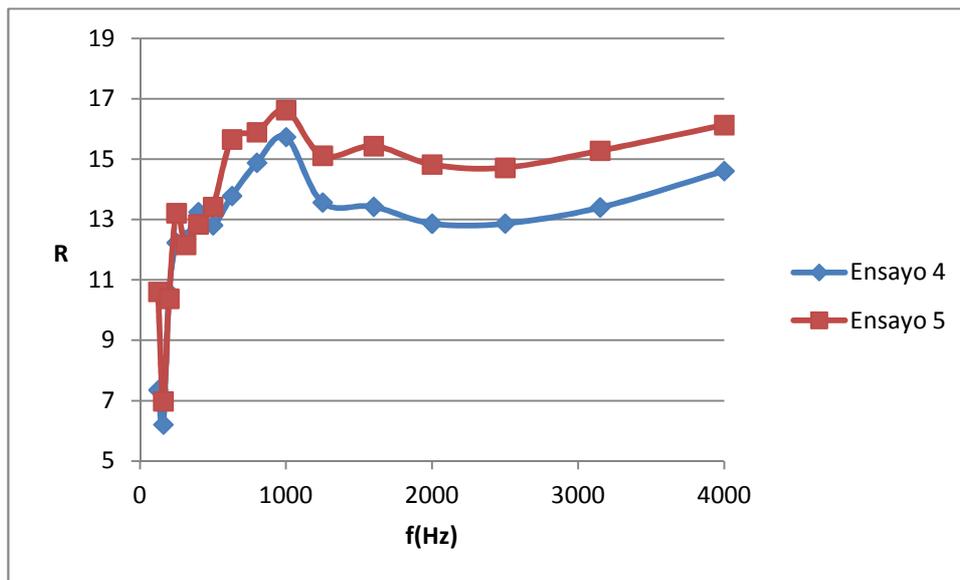
Parece ser, que los resultados del ensayo 6 se asemejan más a los del de presión que los del ensayo 4. Con lo cual, se concluye con que al aumentar la densidad de barrido se mejoran los resultados. Aunque es necesario recordar que no son directamente comparables porque no se miden exactamente el mismo número de áreas. Parece razonable pensar que midiendo 9 áreas a 30 cm y con la densidad de barrido mayor los resultados de presión e intensidad se parezcan mucho.

De la misma forma, que en caso del ensayo 2 (medida por puntos), mientras mayor discretización del ensayo se realice, parece que mejores resultados se obtendrán.

8.2.1.6 Influencia de la sala de ensayo

Por último, comparar ahora el ensayo 4 y el 5, en el cual se intercambié la sala receptora por la emisora. Los resultados obtenidos fueron:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro



Gráfica 9. Influencia de la sala sometida a ensayo.

La gráfica 9 muestra unos resultados parecidos para ambos ensayos, sobre todo a altas frecuencias, aunque cabe destacar que las diferencias son del mismo orden que las anteriores. El hecho de intercambiar las habitaciones receptora y emisora no parece tener apenas influencia en los coeficientes de aislamiento obtenidos. El ensayo 5 se parece más al 6 que el 4, es decir, se podría decir que se ha medido mejor cuando la sala receptora ha sido es el pasillo. La norma no especifica características especiales para la sala receptora, sólo que se cumpla la condición del factor de presión-intensidad, lo cual parece ser, que lo cumple mejor el pasillo. Puede que sea por el ruido de fondo o por los elementos de construcción adyacentes a la superficie de medición que en el caso de la sala de café son mayores y podrían, según la norma, dificultar las medidas. ⁽²¹⁾

Desde el punto de vista del factor de presión-intensidad, para ambos ensayos no fue necesario mejorar el entorno acústico, ya que se cumple a la perfección la condición número 1.

En este caso, no se realizó un ensayo de presión intercambiando las habitaciones, puesto que medir el tiempo de reverberación en el pasillo resultaría más complicado para el ensayo.

8.2.2 ENSAYOS DE AISLAMIENTO POR INTENSIDAD. AISLAMIENTO DE MATERIALES Y EVALUACIÓN DE OTROS PARÁMETROS

Por último, se evaluó la influencia del material aislante de la superficie de medición y se evaluaron otros parámetros como la posición de la fuente, el ruido de fondo y de nuevo la medición por puntos, pero esta vez, se midió en una sola sub-área de la pared.

Ésta sub-área de medición evaluada se encerró en un paralelepípedo, midiéndose así en cada una de las direcciones del espacio para obtener la intensidad total que atraviesa la superficie en concreto. Sin embargo, al ser estas áreas colindantes con el techo, el suelo y la pared, las caras del paralelepípedo que coincidían con dichos elementos no se tuvieron en cuenta, ya que se supone que la intensidad no pasaría a través de ellos. En la siguiente figura puede

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

observarse las caras del paralelepípedo que se midieron la cada sub-área número 5. La cara superior no se midió, ya que al suponer sólo 6 caras totales en la pared, se supondría que ésta cara sería la pegada al techo.

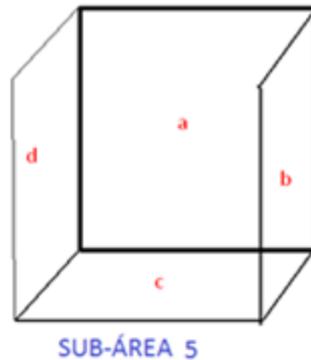


Figura 42. Caras del paralelepípedo medidas en la sub-área número 5

Las letras en rojo corresponden a la numeración de las caras medidas en cada sub-área. Como se aclaró anteriormente, según la imagen 3, las sub-áreas 1, 2 y 3 son de aluminio y las 4, 5 y 6 son de vidrio.

Se aclara, seguidamente, cada uno de los ensayos realizados:

- Ensayo 7. Se realizó un ensayo de barrido para las caras de la sub-área número 5 con una distancia de medición de 30 cm con la superficie de medición, para la fuente sonora en la posición 1 (en el centro del pasillo a 50 cm de la pared de ensayo) y con un ruido de fondo de 30 dBA.

Se eligió esta distancia de medición por arrojar mejores resultados que en los ensayos anteriores.

- Ensayo 8. Ídem al ensayo 6 pero en la sub-área 6.

- Ensayo 9. Ídem al ensayo 6 pero en la sub-área 3.

- Ensayo 10. Ídem al ensayo 7 pero para la fuente sonora en la posición 2 (a 50 cm de la pared de ensayo y a 1 m de la pared norte del pasillo). Para aclarar las diferentes posiciones se adjunta la siguiente imagen:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro



Imagen 4. Posiciones 1 y 2 de la fuente sonora

- Ensayo 11. Ídem al ensayo 7 pero con un ruido de fondo de 50 dBA (se incrementó con una fuente sonora adicional en la habitación receptora)
- Ensayo 12. Ídem al ensayo 7 pero esta vez, se midió por puntos en 4 puntos distribuidos uniformemente a lo largo de la superficie.

Los parámetros de cada uno de los ensayos se especifican en la siguiente tabla:

ENSAYO	MEDICIÓN	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)	SUB-ÁREA DE MEDICIÓN	POSICIÓN FUENTE	RUIDO DE FONDO (dBA)
7	BARRIDO	30	5	1	30
8	BARRIDO	30	6	1	30
9	BARRIDO	30	3	1	30
10	BARRIDO	30	5	2	30
11	BARRIDO	30	5	1	50
12	PUNTOS	30	5	1	30

Tabla 13. Parámetros de medición de los ensayos de aislamiento de cada sub-área

A continuación se adjuntan los resultados de los coeficientes de aislamiento, así como de los índices de presión-intensidad de los ensayos anteriormente descritos:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

f(Hz)	ENSAYO7	ENSAYO8	ENSAYO9	ENSAYO10	ENSAYO11	ENSAYO12
125	9,26	13,40	9,29	10,28	11,37	14,23
160	11,73	8,93	8,57	12,16	10,18	11,38
200	18,33	12,58	13,35	15,20	19,51	9,43
250	16,03	10,89	14,78	17,08	17,80	11,52
315	14,75	14,82	8,50	18,54	13,71	12,91
400	12,92	11,90	11,03	15,45	12,82	11,30
500	15,20	12,97	9,29	15,80	14,30	11,62
630	16,78	14,03	11,86	16,22	12,32	11,89
800	17,65	15,32	13,89	18,77	12,99	11,74
1000	18,39	15,32	12,94	18,49	13,52	11,54
1250	18,38	13,51	13,49	19,25	6,46	12,74
1600	18,11	14,08	14,02	19,55	6,24	13,43
2000	16,58	14,75	10,81	17,48	6,38	13,78
2500	16,61	15,65	10,21	16,93	4,47	11,83
3150	17,80	17,52	12,75	18,25	3,39	10,84
4000	19,73	18,09	15,25	19,70	3,49	12,29
5000	20,61	18,63	15,67	20,65	4,67	13,60

Tabla 14. Coeficientes de aislamiento de los ensayos 7, 8, 9, 10, 11 y 12.

f(Hz)	ENSAYO7	ENSAYO8	ENSAYO9	ENSAYO10	ENSAYO11	ENSAYO12
125	8,54	9,72	7,57	10,81	12,64	12,93
160	9,08	6,19	8,45	7,40	10,52	10,08
200	10,19	6,16	10,36	10,62	14,51	8,13
250	12,35	6,09	8,37	10,52	14,49	10,22
315	8,43	8,55	8,47	13,28	9,99	11,61
400	8,86	7,55	11,63	9,68	11,02	10,00
500	10,91	8,14	12,99	11,21	15,24	10,32
630	10,78	7,87	10,09	10,08	14,00	10,59
800	10,23	7,77	9,91	11,85	15,38	10,44
1000	10,78	7,52	11,20	11,98	17,14	10,24
1250	11,44	6,96	8,07	12,73	15,16	11,44
1600	11,44	6,79	10,21	13,19	12,62	12,13
2000	10,91	8,20	13,30	11,73	13,74	12,48
2500	10,57	9,34	11,10	11,40	12,76	10,53
3150	10,74	10,05	11,43	11,58	13,50	9,54
4000	11,77	9,75	10,56	11,87	15,17	10,99
5000	12,02	10,28	6,75	12,47	16,12	12,30

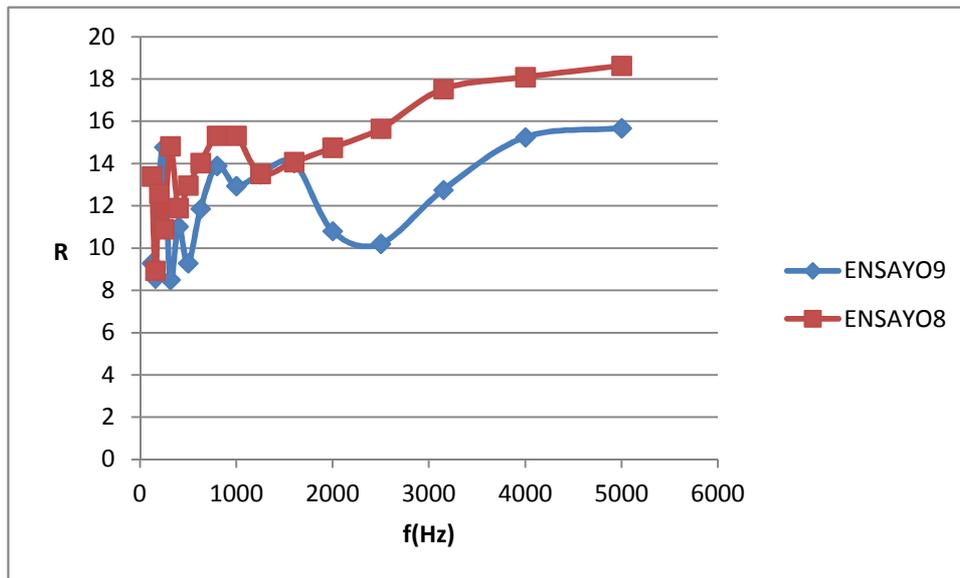
Tabla 15. Factores de presión-intensidad de los ensayos 7, 8, 9, 10, 11 y 12.

Al igual que en la tabla 11, los valores en rojo son aquellos que no cumplen la condición 1 y los verdes son aquellos que sí la cumplen.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

8.2.2.1 Influencia de los materiales de la superficie de medición

Se comparan en la siguiente gráfica los ensayos 8 y 9 realizados en dos sub-áreas de la misma área, pero de diferente material. En el ensayo 8 se evaluó la sub-área 6 de vidrio y en el ensayo 9 se evaluó la sub-área 3 de cristal. En la siguiente gráfica se observan los resultados:



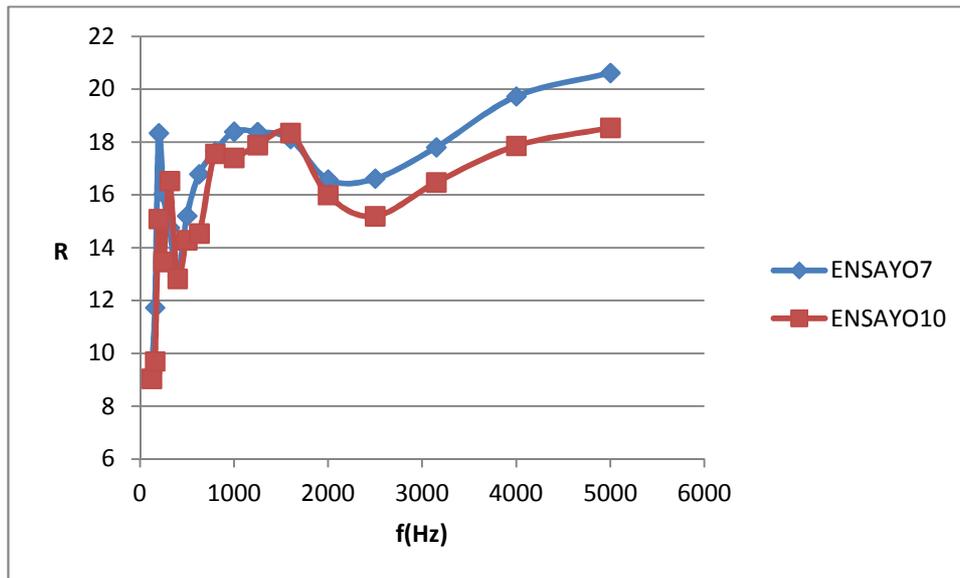
Gráfica 9. Comparación de los ensayos 8 y 9

A simple vista tras observar la gráfica, parece que el material que más aísla es el vidrio, ya que los coeficientes de aislamiento de mayor magnitud corresponden a los obtenidos en el ensayo 8, realizado en la cara de vidrio. Los resultados parecen bastante fiables ya que los índices de presión-intensidad resultan adecuados según la tabla anterior, no totalmente para el ensayo 9 en todas las bandas pero sí en muchas de ellas.

8.2.2.2 Evaluación de la posición de la fuente

Para analizar la influencia de la posición de la fuente sonora en la sala emisora se compararon en la siguiente gráfica los ensayos 10 y 7:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro



Gráfica 10. Evaluación de la posición de la fuente

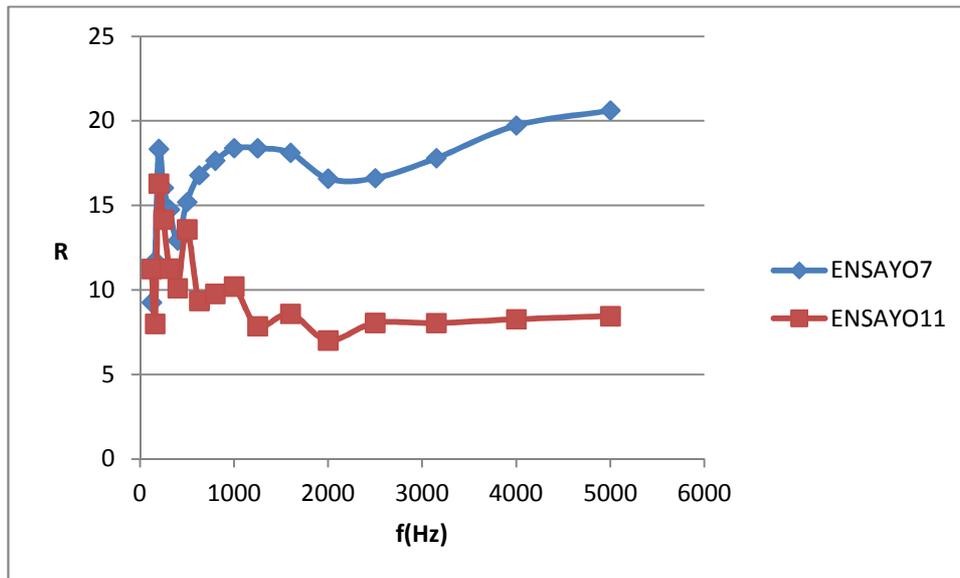
Excepto una par de valores a bajas frecuencias de la curva del ensayo 10, el resto de valores se asemejan bastante en las dos curvas, sobre todo a altas frecuencias, con lo cual, parece que, en general, la posición de la fuente no es un factor muy influyente en los resultados. Sin embargo, parece que la curva del ensayo 7 es más fiable al cumplirse la condición del factor de presión-intensidad para más bandas de frecuencia que en lo que al ensayo 10 se refiere.

Podría concluirse pues, que la posición de la fuente sonora perjudica al entorno de medición. Aunque si se presta atención a los valores de referencia de la tabla 15 del índice residual, los valores del factor de presión del ensayo 10 no incumplen la condición 1 por mucho, con lo cual, puede que aumentando un poco más la distancia de medición para este ensayo se mejorarían los resultados.

8.2.2.3 Evaluación del ruido de fondo

En el ensayo número 11 se incrementó el ruido de fondo en la sala receptora para evaluar su influencia en las medidas de intensidad. En la siguiente gráfica se comparan los resultados con los del ensayo 7:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro



Gráfica 11. Evaluación del ruido de fondo

A primera vista parece que ambas curvas presentan pocas semejanzas. Los valores que toma la curva del ensayo 13 a bajas frecuencias resultan dispares, en el sentido de que no siguen una tendencia estable y a altas frecuencias parece que R disminuye en lugar de aumentar.

Si se comparan ambas curvas, en general parece que el ruido de fondo disminuye el coeficiente de aislamiento. Es posible que en algunos casos, la sonda capte más intensidad proveniente del ruido de fondo que de la fuente sonora, lo cual, cambiaría el sentido de las L_i , volviéndolas negativas y disminuyendo el valor de R.

Otra fuente de errores podría ser el hecho de que el ruido de fondo a ciertas frecuencias emita a valores altos similares a la emisión de la fuente sonora. Para comprobar esto, se comparan los valores de los L_p del ruido de fondo y los L_p de emisión en la siguiente tabla:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

f(Hz)	Lp1	Lp_fondo
125	76,6	33,3
160	80,8	39,9
200	83,5	40,6
250	82,4	46,8
315	81	45,5
400	78,6	47,1
500	76,8	52,9
630	75,7	59,4
800	75,1	62,1
1000	73,5	57
1250	71,6	57,1
1600	73,5	58,5
2000	71,9	57,7
2500	70,4	57
3150	69,4	57,2
4000	66,8	56,7
5000	64,7	54,5

Tabla 16. Comparación de los Lp en el ensayo 13.

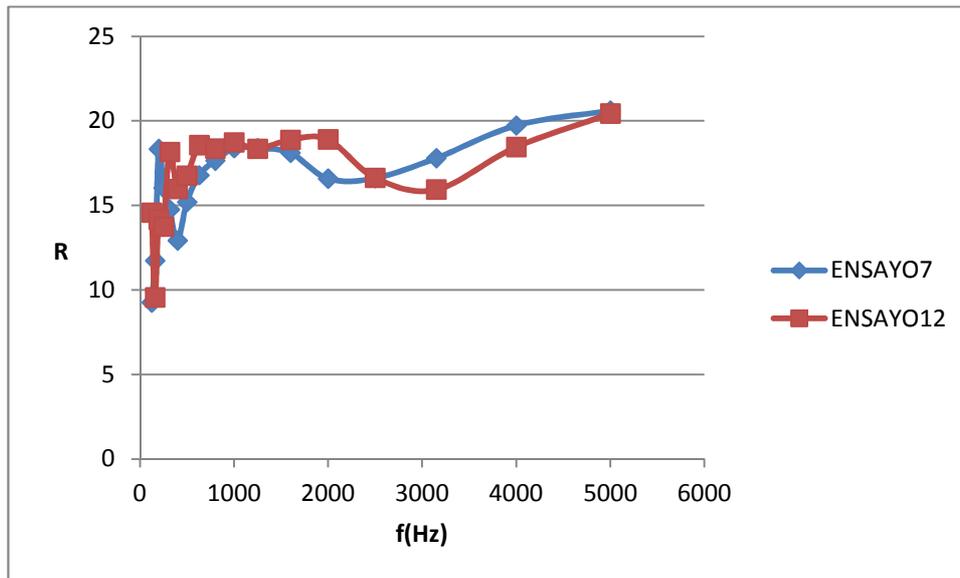
Se observa en la tabla que para la banda de 800 Hz, el valor del ruido de fondo (62,1 dB) se asemeja un poco al emitido por la fuente sonora (75,1 dB). Podría ser esto una explicación a los valores dispares de R en la curva del ensayo 13 en torno a esta banda de frecuencia.

Sin olvidar, claro está, los valores del factor de presión-intensidad del ensayo 11 (ver tabla 15) que desacreditan por completo la fiabilidad de los resultados del ensayo 11.

8.2.2.4 Evaluación del método de medida

Por último se compararon el ensayo 7 y el 12, para analizar la influencia del método de medida (por puntos o por barrido):

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro



Gráfica 12. Evaluación del método de medida en la sub-cara 5

Las curvas de los ensayos 7 y 12 presentan muchas similitudes en cuanto a la tendencia y a los valores de los resultados tal como se observa en la gráfica.

Esta vez, en el ensayo 12, en lo que a la medición por puntos se refiere se aumentó el número de medidas (cuatro puntos por cada sub-cara de medición) a diferencia del ensayo 2 para así, comprobar si se podían mejorar los valores del factor de presión-intensidad. Ello puede apreciarse en la tabla 15, donde efectivamente parece que los valores del factor son mejores, aunque no del todo, claro está. Sin embargo, al igual que en el ensayo 10, éstos valores se alejan de los índices residuales por poco.

9. CONCLUSIONES

A la vista del estudio realizado y de los resultados expuestos a lo largo del texto, se han alcanzado una serie de conclusiones que de forma resumida se desarrollan a continuación.

A continuación, se dividirá el presente capítulo en dos partes. La primera de ellas dedicada a las conclusiones obtenidas al comparar los métodos de presión e intensidad y en la segunda se incluirán única y exclusivamente las conclusiones de la evaluación de los diferentes parámetros del método de intensidad.

9.1 CONCLUSIONES DE LA COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE PRESIÓN

El método convencional para medir el aislamiento acústico de paneles y tabiques consiste en determinar la pérdida de transmisión sonora (también llamada índice de reducción de sonido). El método tradicional para medir éste parámetro requiere por regla general dos habitaciones reverberantes. La potencia acústica incidente en la habitación emisora se deduce de una estimación de la presión sonora media en un campo difuso y la potencia transmitida se determina a partir de una medición similar en la sala receptora donde, además, el tiempo de reverberación debe ser calculado.

El nuevo método de intensidad ha hecho posible medir la potencia transmitida directamente a través de una sonda intensidad. En este caso, no es necesario que el campo sonoro en la sala receptora sea difuso, lo cual implica que sólo una habitación se supone reverberante (la sala emisora). Sin embargo, no se puede obtener la potencia incidente en la sala emisora midiendo la intensidad, ya que el método proporciona la intensidad del sonido neta en la habitación emisora.

La principal ventaja del método de la intensidad sobre el enfoque convencional es que es posible evaluar la pérdida de transmisión de partes individuales de la superficie sometida a ensayo. Sin embargo, debe satisfacerse la condición del índice de presión-intensidad para cada una de las medidas de intensidad. El método de presión, también proporciona otros errores, al no tener en cuenta la absorción de la superficie. En cambio, si una parte de la absorción en la sala receptora se debe a la partición sometida a ensayo la potencia incidente es menor que la transmitida. Bajo tales condiciones se debe aumentar la absorción de la sala de recepción; si no es así, el método de intensidad sobreestimaré la pérdida de transmisión debido a que la potencia acústica transmitida se subestima.

A menudo se ha detectado que el método de intensidad proporciona menores valores del coeficiente de aislamiento que el método de presión a bajas frecuencias y valores más altos a altas frecuencias, como se ha podido observar en algunos ensayos del presente proyecto. Sin embargo, esta regla no ha sido totalmente confirmada por los estudios más recientes. ⁽⁵⁾

En general, parece ser que el método de intensidad resulta más beneficioso a la hora de evaluar el aislamiento sonoro de una habitación. Es decir, a igualdad de resultados entre los dos métodos, el de intensidad, ofrece mayores ventajas al proporcionar un promedio espacial del aislamiento a lo largo de toda la partición y no sólo un valor global y sobre todo, al no verse

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

condicionado por el campo reverberante de la habitación receptora. Por ello, el método de intensidad permite, analizar el aislamiento de una parte de la superficie de medición en concreto y no de la superficie al completo, como ocurre con el método de presión. Además de gran importancia es el hecho de no necesitar determinar el tiempo de reverberación en la sala receptora.

9.2 CONCLUSIONES DE LOS PARÁMETROS DEL MÉTODO DE INTENSIDAD

- Si se atiende sólo al método de intensidad, el hecho de aumentar la distancia de medición, tal como citaba la norma ISO-15186-2, ofrece mejores resultados del coeficiente de aislamiento.
- El método de barrido, a diferencia del método de puntos, ofrece mayores ventajas al no necesitar la realización de tantas medidas para arrojar resultados óptimos. Sin embargo, también resulta más complicado el hecho de realizar un barrido con la sonda que el hecho de medir en un sólo punto de forma individual.
- Para el caso sometido a ensayo, factores como la posición de la fuente sonora o el hecho de intercambiar las habitaciones emisora y receptora no afectó a los resultados obtenidos.
- Otros factores como un alto ruido de fondo en la habitación receptora afectaron de manera perjudicial a los coeficientes de aislamiento. Este ruido de fondo afectaron significativamente al campo sonoro sometido a ensayo, lo cual, afecta mucho a la precisión de las medidas de intensidad.
- Las partes de vidrio de la pared de medida ofrecieron presentaron mayores coeficientes de aislamiento sonoro que las partes de aluminio, concluyéndose pues, que dichas partes aislaban más que las de aluminio.
- En resumen, el método de intensidad aplicado al aislamiento sonoro arroja mucha más información y precisión en las medidas que el método de presión, e incluso puede resultar más óptimo para algunos casos concretos. Sin embargo, el hecho de que sea un método más preciso, lo hace a su vez, más complicado a la hora de llevar a cabo las medidas. Es necesario, tener en cuenta todos los parámetros evaluados en este proyecto (distancia de medición, densidad de barrido, ruido de fondo...) para llevar a cabo mediciones adecuadas y por ende, obtener resultados fiables. Además, las condiciones del entorno de medida pueden afectar mucho a los equipos, impidiéndose así obtener resultados fiables. Materiales absorbentes o salas de ensayo con elementos que compliquen el campo sonoro pueden perjudicar los ensayos de tal forma, que sea imposible alcanzar resultados óptimos.

10. BIBLIOGRAFÍA Y NORMATIVA

10.1 BIBLIOGRAFÍA

- (1) REQUENA RAMOS I. Universidad de Granada. *Medidas de ruido*. Disponible en la web: http://www.ugr.es/~ramosr/CAMINOS/conceptos_ruido.pdf
- (2) MAYO NÚÑEZ J. Universidad de Sevilla. ASIGNATURA DE INGENIERÍA ACÚSTICA. *Magnitudes Acústicas y niveles de medida*
- (3) PÉREZ VILLALOBOS J.A., RAMOS O.A., URQUIZA MANZANELLI A.J., CONTRERA H., NOVILLO D.A. *Análisis de ruidos de motores eléctricos aplicando intensimetría sonora*. Mecánica Computacional Vol XXXI, págs. 4029-4045 Noviembre 2012
- (4) EGEA J., SÁNCHEZ C., RODRIGUES C.C, LATORRE E. *Identifying acoustic bridges by using beamforming and sound intensity in situ measurement technique*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Noise and sustainability 2010
- (5) JACOBSEN. *Sound intensity and its measurement and applications*. Technical University of Denmark. 2003
- (6) CHEN S., WANG D. LIANG J., GUO C. JIEHONG H. *Noise source identification of a passenger car based on sound intensity measurement*. University of Jillian. Sciencedirect-Elsevier. Applied acoustics 2005
- (7) URQUIZA MANVANELLI A.J. LUNATI V.I. *Intensimetría sonora: metodología y aplicaciones*. Facultad regional de Córdoba. Cátedra Fundamentos de Acústica y Electroacústica- Mayo 2012 Argentina
- (8) AIMME INSTITUTO TECNOLÓGICO METALMECÁNICO. *Determinación de la potencia, presión e intensidad sonora*. Disponible en la web:
<https://www.aimme.es/informacion/faqs/ficha.asp?id=555>
- (9) GIRÓN CRUZ A. *Medidas de potencia mediante medidas de intensidad en máquinas tractoras de ascensor*. Universidad de Sevilla
- (10) BRÜEL & KAEJER. *Intensidad y potencia sonora*. 27 y 28 de Marzo de 2003
- (11) MUNUERA SAURA G. *Técnicas avanzadas de medida en intensimetría acústica para la caracterización de materiales aislantes*. Universidad Politécnica de Cartagena- Departamento de Ingeniería Mecánica 2008
- (12) FAHY F.J. *Sound Intensity* E & FN Spon 1995
- (13) MACHIMBARRENA GUTIÉRREZ M. *Estudio comparativo del aislamiento sonoro por los métodos de presión e intensidad*. Universidad de Valladolid-Departamento de física y óptica aplicada-1999
- (14) HIGINAI ARAU. *ABC de la acústica arquitectónica*. Ediciones CEAC. 1999

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

(15) HONGISTO V. *Airborne sound insulation of wall structures- measurement and prediction methods*. Helsinki University of Technology, Espoo Report 56 2000

(16) MÖSER M, BARROS J.L. *Ingeniería acústica. Teoría y aplicaciones*. Springer 2009

(17) MAYO NÚÑEZ J. Universidad de Sevilla. ASIGNATURA DE INGENIERÍA ACÚSTICA. *Aislamiento*

(18) G.R.A.S. SOUND AND VIBRATION. *Instruction manual Sound Intensity Probe Type 50A1*. Brüel & Kaejer. 2009

(19) 01 dB MVI TECHNOLOGIES GROUP. *dBBA1. Building acoustics. Manual de usuario*. Symphonie measure system 2014

(20) 01 dB MVI TECHNOLOGIES GROUP. *dBFA32. Paquete informático de análisis de frecuencia. Manual de usuario*. Symphonie measure system 2014

10.2 NORMATIVA

(21) ISO 15186-2: *Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción utilizando intensidad sonora. Mediciones in situ*
AENOR: Marzo 2011

(22) ISO 9614-2: *Determinación de posniveles de potencia acústica emitidos por las fuentes de ruido por intensidad del sonido. Medición por barrido*
AENOR: Febrero 1997

(23) ISO 140-4: *Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Mediciones in situ del aislamiento a ruido aéreo entre locales*.
AENOR: Abril 1999

(24) DBHR: *Protección frente al ruido*. CSIC: Agosto 2009

(25) ISO 717-1: *Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo*
AENOR: Agosto 1997