

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: DISEÑO DE UN MÉTODO ESTANDARIZADO PARA EL USO DE LA SONDA DE INTENSIDAD DE MICROFLOWN PARA MEDIDAS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO

AUTOR/A: ÁLVARO RODRÍGUEZ BARROS

TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA DE SONIDO E IMAGEN

TUTOR/A: EDUARDO LATORRE IGLESIAS

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA AUDIOVISUAL Y COMUNICACIONES

VºBº TUTOR/A

Miembros del Tribunal Calificador:

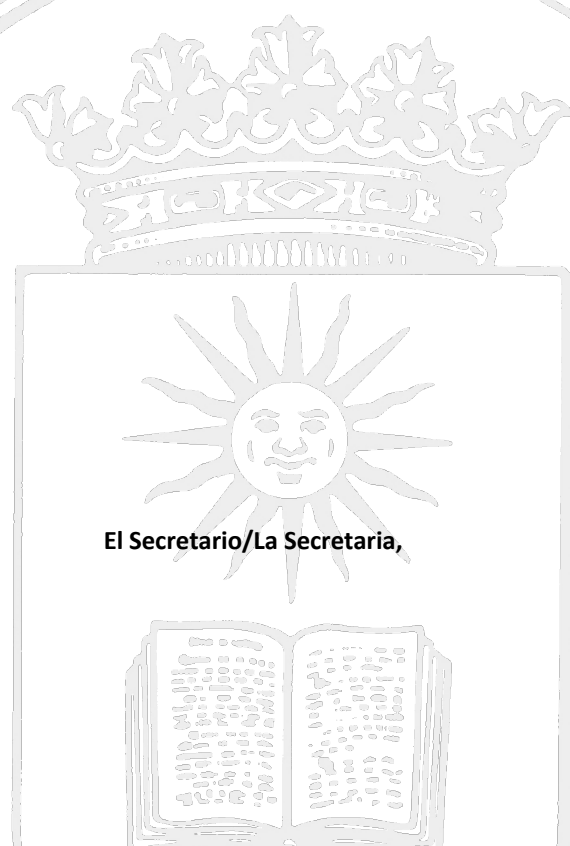
PRESIDENTE/A: JUAN MANUEL LÓPEZ NAVARRO

TUTOR/A: EDUARDO LATORRE IGLESIAS

SECRETARIO/A: ANTONIO PEDRERO GONZÁLEZ

Fecha de lectura:

Calificación:



Agradecimientos

A Javier por su ubicuidad e incondicional apoyo en el transcurso de esta última gran aventura.

A Óscar por su eximia habilidad para enhebrar el hilo de lo posible en una aguja imposible.

A todos los que he conocido en este viaje y me han ayudado a llegar hasta el final.

A Eduardo por la increíble ayuda, trato y confianza en el desarrollo de este proyecto.

A toda mi familia; especialmente a mi padre, mi madre, mi hermana y mi tía. Sin ellos este documento no existiría.

Resumen

DISEÑO DE UN MÉTODO ESTANDARIZADO PARA EL USO DE LA SONDA DE INTENSIDAD DE MICROFLOWN PARA MEDIDAS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO

El proyecto se enfoca en el diseño de una propuesta para estandarizar el método no estandarizado basado en la sonda p-u y el software “Scan & Paint” para utilizar la sonda de intensidad de MicroflowN en medidas de aislamiento acústico. Para ello se exploran diferentes métodos estandarizados como el método de presión bajo la Norma UNE-EN ISO 10140 y el método empleando intensidad sonora de la Norma UNE-EN ISO 15186 .

La primera fase del proyecto expone el contexto en el que se realiza el mismo. En esta fase se aportan datos acerca de la situación actual de la contaminación acústica; qué es, cómo se soluciona, el impacto social y los perjuicios en la salud de las personas. También se presentan a las sondas de intensidad p-p y p-u que se utilizan en los diferentes ensayos del proyecto.

La siguiente fase incluye las normas de aislamiento acústico que se han seguido en el proyecto, así como toda la instrumentación empleada en los ensayos. También recorre el funcionamiento de ambas sondas de intensidad y en qué se basa el principio físico de su funcionamiento.

En total se realizan cuatro métodos de cálculo de aislamiento acústico. En primer lugar, se sigue la Norma UNE-EN ISO 10140 que basa su desarrollo en el empleo de presión sonora para determinar el aislamiento acústico. En segundo lugar, y con el mismo objetivo, se sigue la norma de intensidad UNE-EN ISO 15186 con la sonda p-p, la cual sirve de referencia para comparar los resultados que ofrezca la sonda p-u. En tercer lugar, se determina el aislamiento acústico a través de dos métodos con la sonda p-u. Uno de ellos replicará la metodología expuesta en la norma de intensidad que se emplea en el ensayo con la sonda p-p; el otro emplea únicamente el software propio de la empresa fabricante de la sonda para hallar los índices de aislamiento. Los métodos se calculan a través de estos índices. En el caso del método de presión se denomina índice de reducción acústica y, en el caso del método de intensidad, índice de reducción sonora intensimétrico. Ambos índices son comparables como así lo indican las normas europeas.

En la última fase se comparan los resultados de los cuatro ensayos entre sí y se propone una metodología de medida estándar que trata de obtener los mejores resultados a la hora de realizar estudios de aislamiento con la sonda p-u.

Abstract

DESIGN OF A STANDARDIZED METHOD FOR THE USE OF MICROFLOWN INTENSITY PROBE IN ACOUSTIC ISOLATION MEASUREMENTS

The project focuses on designing a proposal to standardize the non-standardized method based on the p-u probe and the "Scan & Paint" software for using the Microflown intensity probe in sound insulation measurements. To achieve this, different standardized methods are explored, such as the pressure method under the UNE-EN ISO 10140 standard and the sound intensity method under the UNE-EN ISO 15186 standard.

The first phase of the project presents the context in which it takes place. This phase provides data about the current situation of noise pollution, what is it, how it is solved, the social impact, and the health effects on individuals. It also introduces the p-p and p-u intensity probes used in the different tests of the project.

The next phase includes the sound insulation standards followed in the project, as well as all the instrumentation used in the tests. It also explains the operation of both intensity probes and the physical principle on which their functioning is based.

In total, four methods for calculating sound insulation are performed. Firstly, the UNE-EN ISO 10140 standard is followed, which uses sound pressure to determine sound insulation. Secondly, with the same objective, the UNE-EN ISO 15186 standard is followed using the p-p probe, which serves as a reference for comparing the results obtained with the p-u probe. Thirdly, sound insulation is determined through two methods using the p-u probe. One of them replicates the methodology described in the intensity standard used in the test with the p-p probe, while the other solely uses the proprietary software of the probe manufacturer to obtain insulation indices. The methods are calculated based on these indices. In the case of the pressure method, it is called the acoustic reduction index, and in the case of the intensity method, it is called the intensity reduction index. Both indices are comparable, as indicated by European standards.

The last phase compares the results of the four tests and proposes a standard measurement methodology that aims to obtain the best results when conducting insulation studies using the p-u probe.

Índice

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
2. ANTECEDENTES	- 3 -
3. MARCO TEÓRICO	- 5 -
3.1. EL AISLAMIENTO ACÚSTICO	- 5 -
3.2. LA NORMA UNE-EN ISO 10140	- 8 -
3.3. NORMA EN ISO 15186-1	- 11 -
3.3.1. <i>Términos y definiciones del proyecto</i>	- 11 -
3.5.1. <i>La sonda de intensidad sonora p-u Regular</i>	- 15 -
3.5.2. <i>Scan & Paint [4]</i>	- 17 -
4. METODOLOGÍA Y EQUIPAMIENTO	- 19 -
4.1. MÉTODO DE PRESIÓN SONORA.....	- 20 -
4.1.1. <i>Equipo de medida</i>	- 20 -
4.1.2. <i>Conexión de equipos</i>	- 22 -
4.1.3. <i>Ejecución de medidas</i>	- 23 -
4.2. MÉTODO DE INTENSIDAD CON LA SONDA DE BRÜEL & KJÆR	- 24 -
4.2.1. <i>Equipamiento de medida</i>	- 24 -
4.2.2. <i>Conexión de equipos</i>	- 24 -
4.2.3. <i>Ejecución de medida</i>	- 24 -
4.3. MÉTODO DE INTENSIDAD CON LA SONDA P-U DE MICROFLOWN	- 27 -
4.3.1. <i>Equipo de medida</i>	- 27 -
4.3.2. <i>Conexión de equipos</i>	- 28 -
4.3.3. <i>Ejecución de medidas</i>	- 29 -
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	- 37 -
5.1. CÁLCULO DE R	- 37 -
5.2. CÁLCULO DE R_1 CON LA SONDA P-U DE MICROFLOWN	- 41 -
5.3. CÁLCULO DE R_1 CON LA SONDA P-P DE BRÜEL & KJÆR.....	- 52 -
5.4. COMPARATIVA DE ENSAYOS	- 54 -
6. PROPUESTA DE ESTANDARIZACIÓN DEL MÉTODO DE MEDIDA CON LA SONDA P-U DE MICROFLOWN BASADO EN “SCAN AND PAINT”	- 61 -
7. CONCLUSIONES	- 63 -
8. PRESUPUESTO DE PROYECTO	- 65 -
9. RESPONSABILIDAD SOCIAL Y AMBIENTAL	- 67 -
10. BIBLIOGRAFÍA	- 69 -

Índice de figuras

Figura 1. Mapas de intensidad sonora a 125 Hz: medidas paso a paso con sonda p-p y baja velocidad de ventilador (arriba a la izquierda); Mapa de intensidad con sonda p-p y baja velocidad de ventilador (arriba a la derecha); mapa de intensidad con sonda p-u y alta velocidad de ventilador (abajo a la izquierda); Mapa de intensidad con sonda p-p y alta velocidad de ventilador (abajo a la derecha). [7].....	4 -
Figura 2. Esquema del comportamiento de una onda sonora al incidir sobre una solución aislante.	7 -
Figura 3. Patrones de ambos barridos[2].	12 -
Figura 4. Funcionamiento de la sonda B&K [10]	14 -
Figura 5. Sonda p-p de Brüel & Kjaer [11].	15 -
Figura 6. Sonda p-p de Microflown. [12].....	16 -
Figura 7. Patrón de directividad de la sonda p-u de Microflown Technologies [12]. -	17 -
Figura 8. Instalaciones de ArquILAV. Arriba: Cámara reverberante. Abajo Izda.: Cámara de transmisión vertical. Abajo dcha.: Recinto para ensayos de barreras acústicas.[13].....	19 -
Figura 9. Ventana en torno a la que se realizan todos los ensayos.....	20 -
Figura 10. Micrófono montado sobre trípode en el recinto receptor.	21 -
Figura 11. Fuente dodecaédrica.....	21 -
Figura 12. Diagrama de conexionado de equipos utilizados para medir aislamiento acústico empleando el método de presión sonora de la Norma UNE-EN ISO 10140. -	22 -
Figura 13. Diagrama de disposición de equipos para mediciones de aislamiento acústico en cámara reverberante.	23 -
Figura 14. Diagrama de conexionado del ensayo de aislamiento acústico empleando intensidad sonora con la sonda PP de Brüel & Kjaer.	26 -
Figura 15. Calibrador para una sonda p-p de Brüel & Kjaer [14].	26 -
Figura 16. Preamplificador MFPA-1 de Microflown. [15]	27 -
Figura 17. Sistema de adquisición Scout V2 de Microflown. [16]	28 -
Figura 18. Diagrama de conexionado del ensayo de aislamiento acústico con la sonda PU de Microflown.	29 -
Figura 19. Menú de inicio de VELO 5.	30 -
Figura 20. Pestaña de configuración de parámetros en VELO 5.....	31 -
Figura 21. Pestaña de medición del software VELO 5.....	32 -
Figura 22. Pestaña "Process" del software VELO 5 de Microflown.	33 -
Figura 23. Pestaña "Analyse" del software VELO 5 de Microflown.	35 -
Figura 24. Introducción de datos en el método "Transmission Loss" para calcular el aislamiento acústico con el software VELO 5 de Microflown.....	35 -
Figura 25. Comparativa de resultados de los promedios de niveles del ensayo de aislamiento acústico empleando presión sonora.....	38 -
Figura 26. Tiempo de reverberación.....	39 -
Figura 27. Índice de reducción acústica en función de la frecuencia.	40 -
Figura 28. Arriba: Nivel de presión sonora promedio en el recinto emisor. Abajo: Nivel de intensidad sonora en el recinto receptor.	44 -
Figura 29. Índice de reducción sonora intensimétrico e incertidumbre.	45 -
Figura 30. Presión acústica en las bandas de 50-200 Hz (Arriba), 200-1000 Hz (Centro), 1000-5000 Hz (Abajo).....	46 -
Figura 31. Comparativa de las desviaciones estándar de ambos métodos.	48 -

Figura 32. Comparativa de los resultados de RI a diferentes distancias.	- 50 -
Figura 33. Hueco en el que está montada la ventana en el recinto emisor.....	- 50 -
Figura 34. Comparativa entre los índices RI obteniendo la presión con micrófono y obteniéndola con la sonda p-u.	- 51 -
Figura 35. RI obtenido con los distintos separadores de la sonda PP de Brüel & Kjaer... -	54 -
Figura 36. Curvas de nivel de R y RI con descartando el separador de 12 mm, incluyendo las barras de error asociadas a la incertidumbre.	- 55 -
Figura 37. Representación gráfica del resultado del ensayo del método de presión sonora (R) frente al método de intensidad empleando la sonda PP de B&K (RI).	- 55 -
Figura 38. RI de la sonda p-p y R del método de presión.	- 56 -
Figura 39. Representación gráfica del resultado del ensayo del método de presión sonora (R) frente al método de intensidad empleando la sonda PU de Microflown (RI). -	57 -
Figura 40. Comparativa del índice RI de la sonda p-u y el índice RI de p-p	- 58 -
Figura 41. Resultados de todos los métodos de cálculo de aislamiento.	- 59 -

Índice de tablas

Tabla 1. Frecuencias centrales a medir con su tiempo de promediado.	9 -
Tabla 2. Índices de presión-intensidad residuales.	25 -
Tabla 3. Promediado de niveles del ensayo de aislamiento acústico utilizando presión sonora.	37 -
Tabla 4. Diferencia de nivel de ambos recintos con el ruido de fondo.	38 -
Tabla 5. Área de absorción acústica en bandas de tercio de octava.	39 -
Tabla 6. Obtención del índice de reducción acústica y su incertidumbre.	40 -
Tabla 7. Nivel de presión sonora de emisión.	41 -
Tabla 8. Niveles de presión acústica medidos en la sala emisora. Las bandas donde la diferencia de nivel es superior a 1 dB están marcadas en rojo.	42 -
Tabla 9. Niveles de intensidad sonora medidos en la sala receptora. Las bandas donde la diferencia de nivel es superior a 1 dB están marcadas en rojo.	42 -
Tabla 10. Promedio del nivel de intensidad sonora en el recinto receptor.	43 -
Tabla 11. Obtención del índice de reducción sonora intensimétrico.	45 -
Tabla 12. Resultados del método no estandarizado basado en Scan & Paint” obtenidos mediante el software VELO 5 de Microflown.	47 -
Tabla 13. Cálculo de incertidumbre de medidas del método "Transmission Loss". ...	48 -
Tabla 14. Cálculo del nivel de presión sonora promedio de ambas distancias.	49 -
Tabla 15. Cálculo de RI según el método no estandarizado a mayor distancia en el recinto emisor.	49 -
Tabla 16. Cálculo de RI del ensayo de Microflown recogiendo la presión en el recinto emisor con un micrófono en continuo movimiento.	51 -
Tabla 17. Cálculo de RI con la sonda PP de B&K con el separador de 12 mm.	52 -
Tabla 18. Cálculo de RI con la sonda PP de B&K con el separador de 6 mm.	53 -
Tabla 19. Cálculo de RI con la sonda PP de B&K con el separador de 50 mm.	53 -
Tabla 20. Presupuesto del proyecto.	65 -

1. Introducción

Calcular las medidas de aislamiento acústico proporcionado por elementos de construcción está estandarizado por la Norma UNE-EN ISO 10140-4 [1] y la Norma UNE-EN ISO 15186-1 [2]. La primera de las normas define las condiciones de medición y establece su ámbito de estudio en un laboratorio empleando presión sonora, así como también indica las condiciones que debe tener el mismo, mientras que la segunda lo hace empleando intensidad sonora.

El aislamiento acústico consiste en la implementación de material aislante en las superficies limítrofes entre dos o más recintos, de forma que, si se produce un nivel elevado de ruido aéreo en alguno de ellos, éste sea atenuado al atravesar dichas superficies hasta adquirir un nivel aceptable. Esto permite mejorar la calidad de vida de la población que habita lugares sometidos a un nivel elevado de ruido.

Es importante conocer lo anterior, dado que este proyecto está centrado en un dispositivo para la estimación del aislamiento acústico entre recintos desarrollado por la empresa Microflown Technologies [3]. Debido a que se trata de algo novedoso, el uso de dicho dispositivo no se contempla en las normas que definen cómo medir el aislamiento acústico. Por ello, se tratará de establecer un proceso de medida in situ estandarizado cuyos resultados sean equivalentes a los que se obtienen realizando el estudio de aislamiento siguiendo las normas UNE-EN ISO 10140-4 y UNE-EN ISO 15186-1. La razón de ello es que, a diferencia de lo establecido en [1], donde se requiere de la utilización de micrófonos capaces de medir presión sonora; el dispositivo de Microflown [4] es una sonda de intensidad, con micrófono incorporado para medir la presión sonora, y un sensor que registra la velocidad con la que las partículas acústicas atraviesan sus hilos resistivos [5]. Para dar con el método estandarizado de medición con el dispositivo de Microflown, el proyecto se dividirá en dos fases:

La primera será realizar un estudio de aislamiento de un elemento de construcción en cámara reverberante de acuerdo con las especificaciones definidas en [1], sin utilizar el dispositivo de Microflown. Una vez obtenidos los resultados finales, se dispondrá de la misma cámara y elemento de construcción para realizar una serie de medidas utilizando el dispositivo de Microflown siguiendo el método descrito por la norma de intensidad. A diferencia de la instrumentación que se necesita para seguir la norma [1], el dispositivo Microflown implementa un método de escaneo denominado «Scan and Paint». Este método consiste en realizar barridos por la superficie aislante y registrar valores en múltiples puntos de ella. Más adelante, gracias a un software, es posible conocer el valor registrado en cualquiera de los puntos por los que se hizo el barrido.

El segundo proceso consistirá en la comparativa de resultados obtenidos en ambos escenarios de medición y se establecerá un proceso de medida con el dispositivo de Microflown, que se considerará estandarizado para esa cámara reverberante y para ese elemento de construcción.

2. Antecedentes

En este apartado se presentan dos estudios realizados con la instrumentación que se va a emplear en este proyecto para que sirvan como precedente de lo que se quiere realizar y aporte cierto contexto al desarrollo de este Proyecto de Fin de Grado

El primero de ellos es el estudio realizado por Cástor Rodríguez Fernández y Daniel Fernández Comesaña, el cual se centra en la estimación in situ de la pérdida de transmisión de sonido utilizando una sonda de p-u. En el estudio se realizó una prueba de validación en una cámara estandarizada con una ventana como elemento de ensayo utilizando el método “Scan & Paint”. Más adelante se describen los detalles acerca de cómo realizar una medición con este método. Los resultados obtenidos mediante este método se validaron mediante comparaciones con estimaciones obtenidas a través del método estándar de presión sonora para determinar el aislamiento acústico de dos habitaciones. Estas comparaciones demuestran que el cálculo que hace el software para determinar el aislamiento está en buen acuerdo con el procedimiento estandarizado. Los mapas de sonido proporcionan información detallada sobre la distribución de la excitación en la habitación de origen y los puntos críticos de emisión en la habitación receptora . Junto con el mapa de aislamiento acústico a color, este enfoque de medición de intensidad acústica ofrece una forma más sencilla y efectiva de evaluar el aislamiento acústico de elementos constructivos [6].

El segundo estudio se centra en el rendimiento de las sondas de intensidad de sonido p-p y p-u utilizando el método “Scan & Paint”. El estudio se realizó utilizando sensores de vector acústico y se analizó la capacidad del software para capturar la posición y adquirir datos de sonido, como la presión sonora y la velocidad de partícula, en cada posición. Se utilizó una estructura de cuadrícula para procesar los datos y calcular la pérdida de transmisión. Los resultados se muestran en un mapa de colores superpuesto, que muestra la pérdida de transmisión promediada en diferentes bandas de frecuencia (Figura 1). Se compararon los resultados obtenidos con el procedimiento estándar UNE-EN ISO 10140-4:2021 y se encontró que el método “Scan & Paint” proporciona resultados comparables. Se destaca la posibilidad de mejorar la resolución espacial del mapa de colores mediante el uso de una cuadrícula con celdas más pequeñas y un escaneo más detallado [7].

En este proyecto, se utiliza el método "Scan & Paint" (S&P en adelante) para el ensayo de aislamiento acústico con la sonda p-u de Microflown. Aunque en el segundo estudio también se realizan mediciones con la sonda p-p utilizando el método S&P, en este caso se emplea otro software. Para el ensayo con la sonda p-p, se seguirán las pautas establecidas por la norma de intensidad utilizando el software de PULSE. Con esto se definen a continuación los objetivos del proyecto:

- Determinar los índices asociados a aislamiento acústico de acuerdo con las normas UNE-EN ISO 10140-4 y UNE-EN ISO 15186.
 - Método de presión sonora según la norma UNE-EN ISO 10140-4.
 - Método de intensidad sonora según la norma UNE-EN ISO 15186 empleando la sonda p-p de Brüel & Kjaer.

- Método de intensidad sonora según la norma UNE-EN ISO 15186 empleando la sonda p-u de Microflown.
- Método no estandarizado utilizando Scan & Paint y la sonda p-u de Microflown.
- Comparar resultados
 - Método de presión – Método de intensidad con ambas sondas.
 - Método de intensidad empleando la sonda p-p de Brüel & Kjaer – Método de intensidad empleando la sonda p-u de Microflown.
- Determinar un método de medida estándar con la sonda p-u de Microflown.

La sonda p-p de Brüel & Kjaer se utiliza como referencia, ya que es una sonda contemplada en la norma de intensidad como instrumento de medida estandarizado.

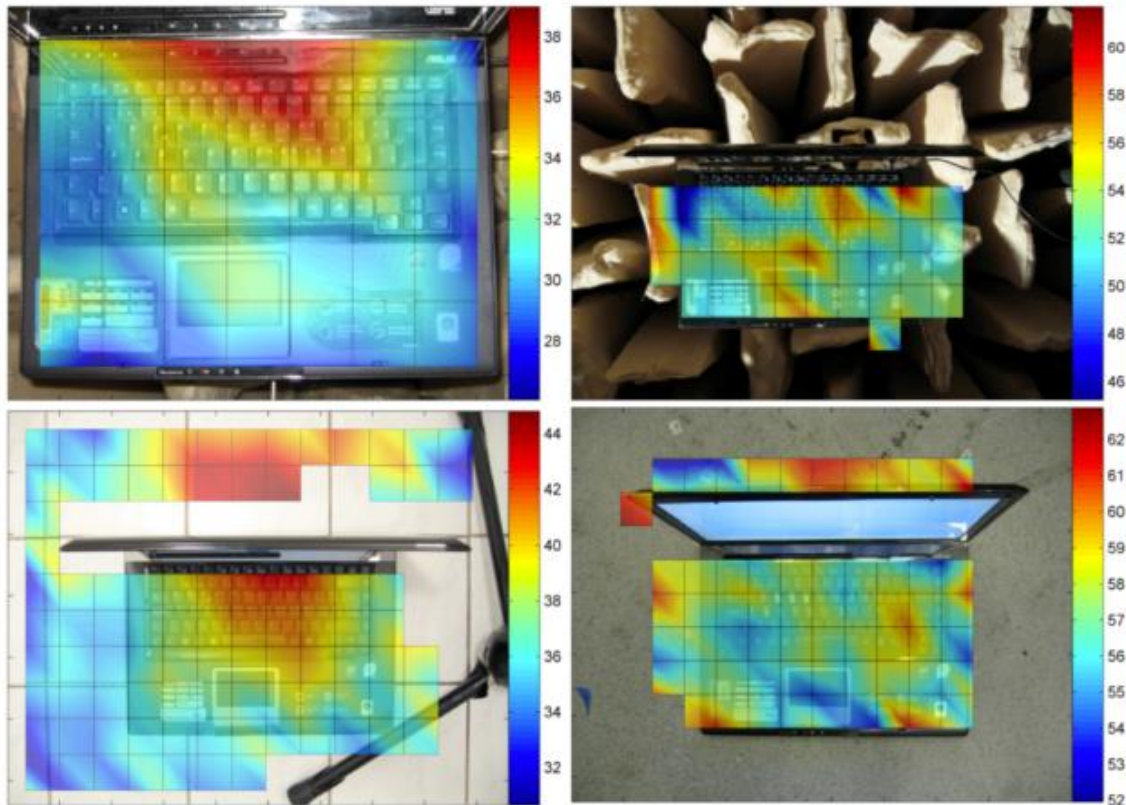


Figura 1. Mapas de intensidad sonora a 125 Hz: medidas paso a paso con sonda p-p y baja velocidad de ventilador (arriba a la izquierda); Mapa de intensidad con sonda p-p y baja velocidad de ventilador (arriba a la derecha); mapa de intensidad con sonda p-u y alta velocidad de ventilador (abajo a la izquierda); Mapa de intensidad con sonda p-p y alta velocidad de ventilador (abajo a la derecha). [7]

3. Marco Teórico

Dado que el proyecto centra su estudio en el análisis y comparativa de dos métodos de medida de aislamiento acústico, es conveniente disponer de una perspectiva general de los conceptos y herramientas sobre los que se apoya el mismo, así como de una ampliación de la información proporcionada por la documentación que se emplea en los distintos estudios; tanto de metodología de medición como de aislamiento acústico. De la misma manera, es pertinente conocer el ámbito tecnológico en el que tiene lugar el proyecto y las ventajas que pretende aportar el diseño de la metodología a nivel social y laboral.

3.1. El aislamiento acústico

En zonas con una alta densidad de población, la contaminación acústica cobra un papel protagonista para desgracia de los habitantes, debido a que pueden llegar desarrollar patologías graves relacionadas con la salud e incluso causar la muerte.

La contaminación acústica engloba a todo ruido o vibración que suponga molestia, riesgo o daño para el bienestar de personas y animales, desarrollo de actividades o sea perjudicial para el medio ambiente. Según datos de la OMS (Organización Mundial de la Salud) [8], se considera como ruido cualquier sonido que supere los 65 dB. Por encima de ese umbral se considera que el ruido superior a 75 dB es perjudicial a nivel fisiológico (pérdida de audición, tinnitus, etc.); y a partir de 120 dB, doloroso. Estos niveles suelen verse referenciados en ruido que se produzca de manera puntual, pero también hay que tener en consideración los sonidos que, aun estando por debajo del umbral de 65 dB, son emitidos durante largos períodos de tiempo. Alguien expuesto a niveles altos de ruido constante puede llegar a desarrollar patologías graves en la salud, tanto fisiológicos como psicológicos. A continuación, se muestran las consecuencias más comunes.

- **Psicológicas.** El ruido es capaz de provocar trastornos mentales como el estrés, la depresión, la ansiedad o la histeria, tanto en seres humanos como en animales.
- **Psicopatológicas.** Agrupa las enfermedades relacionadas con los trastornos mentales que se reflejan a nivel fisiológico: dolor de cabeza, aumento de la presión arterial, agitación respiratoria y, a nivel extremo, el infarto.
- **Trastornos del sueño.** Acorde con las recomendaciones de la OMS, para que el sueño sea de buena calidad, el ruido al que debe estar sometida la persona durante el proceso debe ser inferior a los 30 dB. De lo contrario, puede llegar a provocar episodios de agresividad e irritabilidad.
- **Déficit de atención.** La sumisión a ruidos constantes disminuye la capacidad de concentración. Esto puede conllevar a un rendimiento inferior en el ámbito laboral o educativo.

El ruido es ocasionado por múltiples fuentes, de las cuales, se destacan:

- Tráfico automovilístico
- Tráfico aéreo y ferroviario.
- Obras de construcción

- Ocio nocturno
- Animales

Existen planes de concienciación social para tratar de paliar los efectos nocivos de la contaminación acústica. Sin embargo, debido a que las principales fuentes de ruido son producidas, en su mayoría, por la ciudadanía, se necesitarán años para lograr una reducción significativa del ruido. La implementación de tráfico automovilístico eléctrico, el control de ruido debido al ocio en zonas urbanas y la buena educación de animales domésticos se van abriendo paso hacia el nivel de ruido saludable. No obstante, dadas las condiciones y la maquinaria que es necesaria emplear en sus respectivas operaciones, las obras de construcción y el tráfico aéreo necesitarán un margen superior de tiempo para reducir sus emisiones de ruido. Es por esto, que la solución al ruido más popular a corto plazo es el aislamiento acústico.

El aislamiento acústico consiste en la implementación de material aislante en las superficies limítrofes entre dos o más recintos [9]. De forma que, si se produce un nivel elevado de ruido aéreo en alguno de ellos, éste sea atenuado al atravesar dichas superficies aislantes a fin de adquirir un nivel de presión sonora razonable para una buena calidad de vida. Esto permite la adecuación de niveles en zonas habitadas y de trabajo con gran contaminación acústica debido al tráfico, ocio o maquinaria industrial.

Dependiendo del material absorbente que se utilice en el aislamiento, la energía transmitida disminuirá o aumentará en consonancia con la energía que sea absorbida por dicho material. La energía reflejada se relaciona directamente con la calidad del material y variará dependiendo de la capacidad de absorción del mismo.

En la Figura 2 se muestra el esquema simplificado de las tres etapas en las que se reparte la energía de una onda tras incidir en una superficie cuyo objetivo es aislar el ruido exterior. En condiciones iniciales, cuando la onda sonora incide (E_i) sobre la superficie aislante, parte de su energía penetra en ella y el resto se refleja (E_r). La energía que logra introducirse en el material sufre una atenuación debido a que parte de dicha energía es absorbida por el material (E_a) del que está constituido el elemento de construcción en lo que se conoce como pérdida por transmisión. La energía que no es capaz de ser absorbida o reflejada por el material o solución aislante se transmite al medio (E_t). La cantidad de energía que se absorbe depende del coeficiente de absorción acústica del material. Este coeficiente varía dependiendo de la frecuencia de la onda incidente. Por ello, a la hora de instalar el aislamiento de una superficie limítrofe de dos recintos, se utilizan materiales absorbentes de constitución mixta. De esta forma, se logra reducir la transmisión sonora. Ésta puede evaluarse utilizando distintos parámetros. Uno de los más comunes es la pérdida de transmisión.

Se define como pérdida por transmisión a la relación existente entre la energía incidente y transmitida. Dicha relación es expresada en dB y depende de la frecuencia a la que está siendo excitado el material.

$$TL = 10 \log \left(\frac{E_i}{E_t} \right) [dB] \quad (1)$$

Como se ha expuesto anteriormente, la cantidad de energía que es absorbida por el material depende del compuesto del material en el que se hace incidir la onda sonora [10]:

- **Poliuretano.** El poliuretano es un material que, debido a su composición y densidad, se utiliza en su mayoría para el aislamiento de ruido aéreo a través de techos o tabiques.
- **Geotextil.** Un material reciclable que posee una gran capacidad de absorción acústica y aislamiento térmico.
- **Lana de roca.** Es uno de los materiales más utilizados en aislamiento. Gracias a su composición, consta de un coeficiente de absorción acústica elevado.
- **Fibra de vidrio.** Al igual que la lana de roca, la fibra de vidrio es un material óptimo para el aislamiento de ruido aéreo.
- **Planchas asfálticas.** Al tratarse de un material flexible, es un material que se utiliza para la absorción de frecuencias bajas.

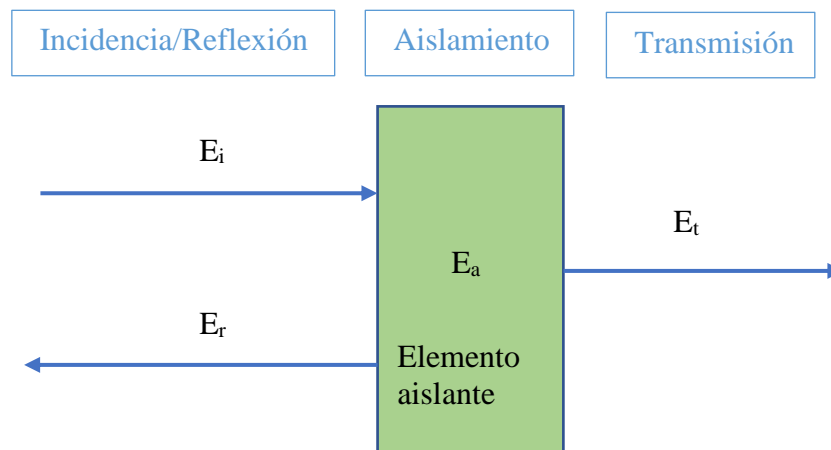


Figura 2. Esquema del comportamiento de una onda sonora al incidir sobre una solución aislante.

Estos materiales son empleados en estructuras de construcción, integrándose en tabiquería, paredes, techos y suelos. Se utilizan en combinación con otros elementos de construcción para lograr un aislamiento acústico eficiente. Dada la importancia de la frecuencia en el comportamiento de los distintos materiales definidos, si se necesitan absorber frecuencias bajas, el elemento de construcción separador de dos recintos debe ser más grueso cuanto más baja sea la frecuencia de la onda sonora incidente. Dicho aislamiento necesario puede estimarse mediante la Ley de masas:

$$TL = 10 \log \left(\frac{m \cdot \omega}{2 \cdot Z} \right) = 20 \log(m \cdot f) - 43 [dB] \quad (2)$$

donde, m es la masa de la superficie $\left[\frac{kg}{m^2} \right]$, f es la frecuencia [Hz]. ($\omega = 2\pi \cdot f$) y Z es la impedancia. (Aire = 415 rayls)

3.2. La Norma UNE-EN ISO 10140

Dada la importancia del aislamiento acústico en la sociedad actual, se ha redactado la familia de normas ISO 10140, cuyas partes especifican la estandarización implementada en Europa con relación a la medición en laboratorio del aislamiento acústico de elementos de construcción. Aunque esta norma incluye métodos para medición in situ y mediciones con diferentes grados de precisión, para este proyecto, cuyo objetivo es el diseño de una metodología estandarizada de medida, se seguirá la parte 4 de dicha norma, debido a que es la destinada a procesos y técnicas de medición básicas en laboratorio.

El proyecto está dividido en dos bloques de medidas, que han sido realizadas en cámara reverberante. En el primero de ellos se ha seguido la norma para medir tanto las características acústicas del recinto como el índice de aislamiento acústico del elemento de construcción. De esta forma, en el primer bloque de medidas se han tenido en consideración los siguientes términos definidos en la Norma UNE-EN ISO 10140-4 [1].

El **nivel de presión acústica energético medio** de un recinto (L), tal y como lo define la norma, «es diez veces el logaritmo decimal del cociente entre el promedio espacio-temporal del cuadrado de la presión acústica y el cuadrado de la presión acústica de referencia, estando el promedio espacial extendido a todo el recinto, a excepción de aquellas partes donde la radiación directa de una fuente sonora o el campo próximo de los límites tienen una influencia significativa» [1]. Para medir esta magnitud, la norma desarrolla dos métodos. El primero de ellos consiste en registrar el nivel de presión acústica en distintas posiciones de micrófono fijas. Estas mediciones se deben realizar utilizando filtros de banda de tercio de octava de, como mínimo, las frecuencias centrales mostradas en la Tabla 1. En dicha tabla, también se indica el tiempo de promediado especificado en la norma para cada banda. La forma de calcular el nivel de presión acústica medio viene dada por la fórmula (3).

$$L = 10 \log_{10} \frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{n p_0^2} [dB] \quad (3)$$

donde p_1, p_2, \dots, p_n son las presiones acústicas cuadráticas medias (R.M.S), n es el número de posiciones de micrófono y p_0 es la presión cuadrática de referencia.

Sin embargo, dado que a la hora de realizar las mediciones en la práctica se registran los niveles de presión acústica y el nivel energético medio, se prefiere la utilización de la fórmula (4).

$$L = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} [dB] \quad (4)$$

donde L_1, L_2, \dots, L_n son los niveles de presión acústica y n el número de posiciones de micrófono.

Tabla 1. Frecuencias centrales a medir con su tiempo de promediado.

Frecuencia central [Hz]	Tiempo de promediado [s]
100	>6
125	>6
160	>6
200	>6
250	>6
315	>6
400	>6
500	>4
630	>4
800	>4
1000	>4
1250	>4
1600	>4
2000	>4
2500	>4
3150	>4
4000	>4
5000	>4

Para mediciones de aislamiento de ruido aéreo con posiciones de micrófono se indican, además, dos posibles escenarios. Si a la hora de realizar las medidas se utiliza más de un altavoz o éste es móvil, el número mínimo de posiciones de micrófono que han de estudiarse es de cinco por recinto. En cambio, si se utiliza un solo altavoz, deben tenerse en cuenta un mínimo de cinco posiciones de micrófono por cada posición de altavoz. En ambos casos, las posiciones de micrófono deben distribuirse de forma que cumpla con las especificaciones de distancias de separación mínima. De la misma manera, «dos posiciones de micrófono no deben de situarse en el mismo plano con respecto a los límites del recinto ni estar en los vértices de una cuadrícula regular» [1].

Distancias de separación mínimas para posiciones de micrófono:

- 0,7 m entre posiciones de micrófono fijas.
- 0,7 m entre cualquier posición de micrófono y los límites del recinto.
- 0,7 m entre cualquier posición de micrófono y cualquier difusor.
- 1,0 m entre cualquier posición de micrófono y el elemento de ensayo.
- 1,0 m entre cualquier posición de micrófono y la fuente sonora.

El segundo método de medición desarrollado por la norma consiste en la utilización de un micrófono en continuo movimiento. Dicho micrófono debe moverse describiendo una circunferencia con respecto a un punto fijo a velocidad constante, o barrer, en un intervalo de tiempo, en un arco de circunferencia lo más grande posible (superior a 270°). En este método, el tiempo de promediado debe ser superior a 30 segundos. Si el altavoz

utilizado en el recinto es móvil, el período de medición debe ser el mismo que el tiempo de movimiento del altavoz y superior a 30 segundos. El nivel de presión acústica energético medio viene dado por la fórmula (5).

$$L = 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} p^2(t) dt}{p_0^2} \quad [dB] \quad (5)$$

donde p es la presión acústica [Pa], p_0 es la presión acústica de referencia ($20\mu\text{Pa}$) y T_m es el tiempo de integración [s].

Al igual que en las mediciones con posiciones de micrófono fijas, se dan dos posibles escenarios. Si se utiliza más de un altavoz simultáneamente o uno móvil, la medición debe hacerse (al menos una vez) con un micrófono en continuo movimiento cuyo radio de barrido sea como mínimo de 1 metro. Dicho barrido debe hacerse sobre un plano inclinado de forma que logre cubrir el mayor espacio permitido en el recinto, pero sin formar un ángulo inferior a 10° con paredes, suelo o techo. El barrido debe tener una duración de un período de recorrido superior a 15 segundos. Por otro lado, si únicamente se utiliza un altavoz, la medición de hacerse (al menos una vez) con un micrófono en continuo movimiento por cada posición de altavoz y con un radio de barrido superior a 1 metro. De la misma forma que con múltiples altavoces, el barrido utilizando un único altavoz debe hacerse sobre un plano inclinado de forma que logre cubrir el mayor espacio permitido en el recinto, pero sin formar un ángulo inferior a 10° con paredes, suelo o techo. La duración de un período de recorrido debe de ser, también, superior a 15 segundos.

El segundo término que se presenta en la norma y que resulta relevante para el desarrollo del proyecto es el **tiempo de reverberación** del recinto, (T). El tiempo de reverberación de un recinto es el tiempo que toma al nivel de presión acústica disminuir 60 dB desde que la fuente sonora dejó de emitir la señal [1]. Esta magnitud se mide en segundos.

Con el objetivo de que el ruido debido a la instrumentación empleada en el recinto o el ruido del exterior no interfiera en el análisis de las medidas, la norma define el **nivel de ruido de fondo**. El nivel de ruido de fondo es el «nivel de presión acústica medido en el recinto receptor procedente de todas las fuentes distintas al altavoz» [1]. Una vez obtenidos los resultados de las mediciones de nivel de ruido de fondo, se debe realizar una corrección para el nivel de ruido de fondo. Si la diferencia de niveles, L_{sn} , cumple que $6 \text{ dB} < L_{sn} < 15 \text{ dB}$, se debe realizar dicha corrección atendiendo la fórmula (7).

$$L_{sn} = L_s - L_b [dB] \quad (6)$$

siendo L_s es el nivel de señal [dB] y L_b es el nivel de ruido de fondo [dB].

Si $6 \text{ dB} < L_{sn} < 15 \text{ dB}$,

$$L = 10 \lg \left(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right) [dB] \quad (7)$$

siendo L_{sb} es el nivel de señal y de ruido de fondo combinados [dB] y L es el nivel de señal ajustado [dB].

Por último, y el objetivo final del análisis de los anteriores términos, se define en la Parte 2 de la norma el **índice de reducción acústica, R** , que puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (8)$$

siendo L_1 es el nivel de presión acústica promedio de la energía en el recinto emisor, en dB. L_2 es el nivel de presión acústica promedio de la energía en el recinto receptor, en dB. S es el área de la abertura de ensayo libre en la que se instala el elemento de ensayo, en m². A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m².

3.3. Norma EN ISO 15186-1

En este apartado se describen los principales términos y metodología de medición de la norma de intensidad sonora. Esta norma se utilizará para los ensayos con la sonda p-p y p-u.

3.3.1. Términos y definiciones del proyecto

Para poder realizar el estudio de aislamiento acústico con la sonda P-U de Microflown y la sonda de Brüel & Kjaer (B&K en adelante) se necesita analizar la intensimetría acústica. La norma describe un método para determinar el aislamiento acústico a través del **índice de reducción sonora intensimétrico, R_I** y una instrumentación específica capaz de obtener la **intensidad sonora y la presión sonora**.

La norma define la intensidad sonora como:

$$\vec{I} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot \vec{u}(t) \cdot dt \quad (9)$$

donde, $p(t)$ es la presión instantánea en un punto expresada en Pa. $\vec{u}(t)$ es la velocidad instantánea de la partícula en ese mismo punto, en m/s. T es el tiempo de promedio o periodo de integración, en s.

En el caso de la sonda p-u de Microflown, el cálculo de la intensidad lo realiza el propio software Velo 5 en una de sus pestañas de procesado. En el caso de la sonda de B&K, esta magnitud se obtiene a través de un analizado. Como ambas sondas registran la presión sonora y la velocidad de las partículas simultáneamente, la obtención de la

intensidad sonora a través de ambos softwares es tan precisa como permitan los mismos. Por ende, se puede obtener el **índice de reducción sonora intensimétrico**:

$$R_I = L_{p1} - 6 - \left[L_{In} + 10 \lg \left(\frac{S_m}{S} \right) \right] \quad (10)$$

donde L_{p1} es el nivel medio de presión sonora en la sala emisora. L_{In} es el nivel promedio de intensidad sonora sobre la superficie en la sala receptora. S_m es el área total de la(s) superficie(s) de medida. S es el área del elemento de prueba que se ensaya.

A la hora de medir, la norma expone varios procedimientos de barrido dependiendo de la instrumentación y características del elemento sobre el que se va a realizar el ensayo. Como en este proyecto el elemento de medida es una ventana se atiende al apartado 6.4.5 de la norma, el cual describe cómo debe realizarse el barrido y qué se debe tener en cuenta al hacerlo sobre una única área de medida.

Las sondas deben sujetarse de forma que la intensidad resulte positiva. En el caso de la sonda de Microflown, se asirá paralelamente a la superficie de medida, pero girada de forma que el lóbulo que registra la velocidad de las partículas quede perpendicular a dicha superficie. La sonda de B&K debe sostenerse de forma que ambos micrófonos queden perpendiculares a la superficie de medida.

La velocidad a la que se debe barrer la superficie de medida con cada patrón debe estar comprendida entre 0,1 m/s y 0,3 m/s. Como en el ensayo no se contaba con un velocímetro de muñeca y teniendo en cuenta las restricciones de diseño del cuerpo humano, se optó por calcular cuántos barridos eran necesarios en la superficie de medida en 120 segundos y así lograr una aproximación a estas velocidades

La Figura 3 muestra cómo son los patrones de barrido que deben realizarse. Ambos barridos deben estar girados 90° entre sí y juntos conforman una medida completa.

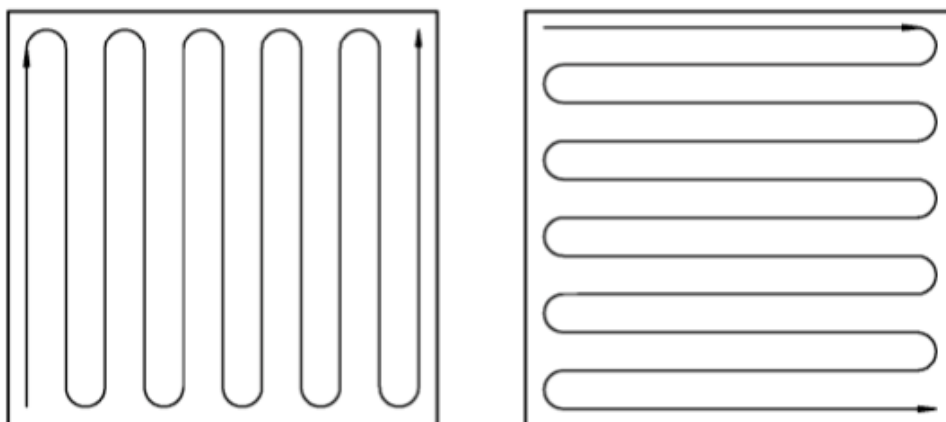


Figura 3. Patrones de ambos barridos[2].

En relación a los barridos, es imprescindible tener en consideración los siguientes puntos para este proyecto:

- La diferencia de medidas entre barridos debe ser inferior a 1,0 dB en cada banda de frecuencias o la medida no será válida. Si la diferencia resulta inferior a 1,0 dB, el resultado de la medida será la media aritmética de lo obtenido en ambos barridos.
- Si para cada uno de los patrones de medida se han realizado varios barridos, el resultado de cada patrón será la media energética de todas las medidas.
- El tiempo mínimo de barrido para cada patrón debe ser de 120 segundos para ventanas, puertas y pequeños elementos de construcción.
- La distancia a la que se debe situar la sonda de la superficie que se está midiendo estará comprendida entre 10 cm y 30 cm.

El ruido de fondo debe ser al menos 10 dB inferior tanto al nivel de intensidad como al nivel de presión sonora. Esto puede comprobarse a través del indicador de campo, F_{pl} . Si el indicador de campo es menor que 10 dB se debe reducir el nivel de la fuente en 10 dB. Sin embargo, si este término varía en menos de 1 dB, el requisito del ruido de fondo se cumple. La ecuación (11) representa la forma de calcular esta diferencia.

$$F_{pl} = L_p - L_{In} \text{ dB} \quad (11)$$

donde, L_p es el nivel medio de presión sonora y L_{In} es el nivel promedio de intensidad sonora sobre la superficie en la sala

El rango de frecuencias que es necesario estudiar para el nivel de presión sonora y el nivel de intensidad sonora está comprendido entre las frecuencias centrales de 100 Hz y 5000 Hz en bandas de tercio de octava. En caso de requerirse datos en bandas de octava, éstos deben obtenerse a partir de las bandas de tercio de octava.

3.4. Sonda p-p

En el campo de la acústica y el aislamiento acústico es fundamental contar con herramientas de medición precisas y confiables para evaluar la eficacia de los materiales y sistemas de aislamiento. En este apartado, se abordará el funcionamiento de la sonda p-p, sus limitaciones técnicas y las ventajas que ofrece en medidas de aislamiento *in situ*, brindando una visión integral para su utilización en mediciones *in situ* relacionadas con el aislamiento acústico.

La sonda de p-p es una herramienta para estimar la intensidad sonora a partir de mediciones de basada en el principio de la medición de velocidad de partículas y presión sonora. Consiste en un par de micrófonos que se colocan enfrentados y perpendicularmente a la superficie del material o estructura que se desea evaluar. Los niveles de presión sonora medidos a sonda registra las vibraciones sonoras y las transforma en señales eléctricas proporcionales, que se pueden medir registrar y analizar utilizando equipos de adquisición de datos y software especializado. A partir de estos datos, y conociendo la separación entre los micrófonos, se puede estimar la intensidad

sonora. La intensidad sonora se refiere a la cantidad de energía acústica que se transmite por unidad de área en una dirección específica y permite evaluar, mediante la norma de intensidad, la eficacia del aislamiento y realizar ajustes o mejoras según sea necesario.

La sonda de intensidad de Brüel & Kjaer es una herramienta altamente eficiente para medir el sonido y sus propiedades en diferentes rangos de frecuencia. El rendimiento óptimo de esta sonda se logra utilizando diferentes tamaños de separadores. El separador de 6 mm es más efectivo en el rango de frecuencias de 250 Hz a 10 kHz. Por otro lado, el separador de 12 mm lo es en el rango de 125 Hz a 5000 Hz, mientras que el separador de 50 mm es más adecuado para el rango de 35 Hz a 1250 Hz. Estas diferencias se relacionan directamente con el hecho de que, al aumentar la distancia entre los separadores, se vuelve más difícil discernir correctamente la fase de la onda. Por lo tanto, el uso de los separadores específicos según el rango de frecuencias permite obtener mediciones más precisas y confiables de la intensidad del sonido. La Figura 4 muestra el funcionamiento de la sonda cuando una onda sonora incide sobre los micrófonos.

La velocidad de las partículas se obtiene calculando la diferencia de fase que ha sufrido la partícula al pasar entre los dos micrófonos. Se utiliza el gradiente de la presión porque ambas magnitudes (velocidad y presión) varían de forma simultánea. Por ello, conociendo la distancia entre los micrófonos y los valores de presión en cada uno de ellos, puede estimarse la velocidad de las partículas en el punto medio de la separación de los micrófonos.

$$\left\{ \begin{array}{l} u = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_B - p_A}{\Delta r} dt \\ p = \frac{p_A + p_B}{2} \\ I = \overline{p \cdot u} \end{array} \right\} I = -\frac{p_A + p_B}{2\rho\Delta r} \int (p_B - p_A) dt \quad (12)$$

donde p_A y p_B son la presión captada por el micrófono A y el micrófono B respectivamente, Δr es el gradiente de la distancia entre los dos micrófonos y ρ es la densidad del aire.

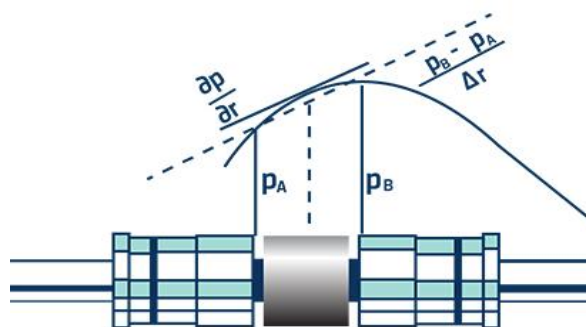


Figura 4. Funcionamiento de la sonda B&K [10]

Limitaciones técnicas:

- **Influencia del entorno:** Las mediciones con la sonda de B&K pueden estar sujetas a interferencias del entorno, como ruido ambiental o vibraciones externas, lo que puede afectar la precisión de los resultados. Es importante minimizar estas influencias durante las mediciones para obtener resultados más precisos.
- **Limitaciones en el rango de frecuencia útil:** La sonda puede tener limitaciones en términos del rango de la gama de frecuencias útil en función del separador que se utilice. Es importante tener en cuenta si se desea contemplar un rango de frecuencias lo más amplio posible, ya que se precisará de tantas medidas como separadores se empleen.

La Figura 5 muestra la sonda p-p de Brüel



Figura 5. Sonda p-p de Brüel & Kjaer [11].

3.5. Microflown Technologies

Microflown Technologies es una empresa que fue fundada en 1998 como consecuencia del desarrollo del sensor de velocidad de partículas inventado por Hans Elias de Bree cuatro años antes. Junto con Alex Koers, Microflown Technologies se convirtió en la empresa que hizo posible la existencia del único sensor en el mundo capaz de medir directamente la velocidad de una partícula de la onda sonora. De esta forma, se convirtió en una de las empresas innovadoras más relevantes en el ámbito acústico. Este proyecto nació en la Universidad de Twente, Países Bajos. De Bree, al finalizar sus estudios, reunió a un grupo de ingenieros e investigadores junto a los que, tras años de trabajo, logró introducir el producto final en el mercado. Actualmente, Microflown cuenta con una amplia línea de productos orientados a la medida y estudio de la acústica, entre los que se encuentra la sonda en torno a la que gira el objetivo de este proyecto. La Figura 6 muestra una imagen de la sonda p-u de Microflown.

3.5.1. La sonda de intensidad sonora p-u Regular

Identificar las áreas emisoras de ruido y vibraciones de una fuente de ruido es uno de los principales desafíos a los que se lleva enfrentando la acústica desde sus primeros estudios. Actualmente, existen herramientas capaces de ofrecer resultados muy precisos

si se conoce su geometría y sus medidas se realizan en entornos controlados acústicamente. Sin embargo, estas herramientas, a veces, necesitan de un método de estudio más elaborado, caro y complejo de escenarios en los que se maneja la presión sonora para obtener resultados fiables sin tener la garantía de conseguirlos. Por ello, la sonda p-u incluye un sensor formado por dos hilos calientes que es capaz de medir de forma directa la velocidad de partícula de las ondas sonoras y representación gráfica del comportamiento de las mismas, la convierte en una herramienta de extrema utilidad en fuentes in-situ, ya que el rango de frecuencias en el que se toman las medidas o la reverberación del recinto tienen poca influencia en el resultado final. La visualización del sonido da pie a la comprensión del comportamiento acústico de la fuente sonora y del campo acústico que genera, así como la posible problemática acústica que pueda darse en el recinto.



Figura 6. Sonda p-p de Microflown. [12]

A la hora de realizar medidas con la sonda, al igual que con micrófonos de presión sonora, hay que tener en cuenta un componente habitual en las salas de ensayo: el ruido de fondo. La sonda p-u se comporta de manera diferente a como lo hacen los micrófonos convencionales con el ruido de fondo. Esto es debido a que, como se dijo anteriormente, la sonda p-u mide la velocidad de partícula y la presión sonora. En campo cercano, el nivel de la velocidad de partícula es, en general, mayor que el nivel de presión sonora. La manera de traducir esta relación entre magnitudes es a través de la impedancia acústica, como se muestra a continuación:

$$Z_{punto} = \frac{p}{u_r} = \rho c \left(\frac{jkr}{jkr + 1} \right) \quad (13)$$

donde, ρ es la densidad del aire. c es la velocidad del sonido, k es la longitud de onda y r es la distancia entre la fuente y el punto de medida.

En campo lejano ($kr \gg 1$), la ecuación (13) se transforma en la ecuación característica de la impedancia acústica del medio. Sin embargo, cuando la distancia entre la fuente y el punto de medida se reduce, la parte imaginaria propicia un cambio de fase entre la velocidad de la partícula y la presión sonora.

También es conveniente comentar la importancia de la directividad de la sonda de la Figura 7. A diferencia de los micrófonos de presión, que cuentan con un patrón de directividad omnidireccional, la sonda tiene un patrón de directividad bidireccional, es decir, es sensible al sonido que llega de frente y desde atrás, pero no a lo que llega por los lados. Como consecuencia de esta característica, es posible focalizar la sonda de manera que pueda obtenerse un resultado muy fiable del comportamiento del sonido en la

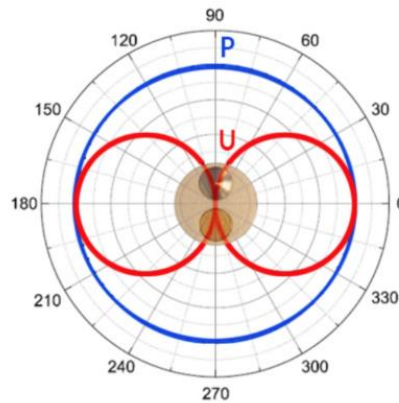


Figura 7. Patrón de directividad de la sonda p-u de Microflown Technologies [12].

ubicación hacia la que está apuntando el transductor sin recibir tanto ruido de fondo. De acuerdo con los estudios realizados internamente por Microflown, la directividad de la sonda p-u actúa como filtro espacial reduciendo un 66% el ruido de fondo causado por campo difuso [3].

3.5.2. Scan & Paint [4]

«Scan & Paint» es el nombre que recibe el método por el cual se obtiene el mapeado acústico del elemento sobre el que se está trabajando. La forma de registrar las medidas consiste en desplazar la sonda p-u a lo largo de un plano bidimensional en el que se concentra la emisión sonora; de forma que, dicho movimiento, quede grabado en una cámara ubicada perpendicularmente al plano de medición. Esta cámara, en la etapa de post-procesado, consta de un detector de color que sitúa la posición de la sonda en cada fotograma y el valor de la medida registrada en dicho fotograma. Luego, gracias a un algoritmo de celda espacial, es posible separar el video en fragmentos y asignarlos en diferentes celdas dependiendo de la posición de la sonda en el momento en el que se realizó la medida. Las variaciones espectrales que se producen a la hora de representar el mapa se consiguen procesando y analizando cada segmento de señal de cada celda.

No obstante, aunque es un método de medición fácil de comprender y de llevar a la práctica, presenta algunas deficiencias de carácter funcional. Al no tener definido un estándar sistemático de cómo realizar la coreografía de medición, el método da cabida a ambigüedades y falsos valores. La sonda no consta de ningún suplemento instrumental que facilite la medida en superficie como, por ejemplo, un brazo de micrófono automatizado que sea capaz de recorrer la superficie siempre de la misma manera en todas las rondas de medidas; así que, se ha de hacer “a mano”. Por ello, estas ambigüedades en

los resultados son siempre producidos por errores humanos. A continuación, se enumeran los principales problemas que se encuentran a la hora de medir una superficie plana, como es el caso de este proyecto:

- **Mantener el plano de medida paralelo a la superficie de medida.** De manera inconsciente o por falta de gracia en el manejo de la sonda, hay fluctuaciones en la distancia a la que está situada la sonda con respecto a la superficie a lo largo de todo el plano de medida.
- **Mantener el eje de directividad perpendicular a la superficie de medida.** Al igual que en el punto anterior y por idénticas razones, también existen oscilaciones en el ángulo de incidencia del sonido respecto al eje de directividad de la sonda.
- **Tantas coreografías como rondas de medida.** Debido a una combinación de los puntos anteriores, resulta imposible considerar que todas las rondas de medida se han realizado de exacta manera y, por consiguiente, que sean comparables en un nivel alto de detalle.

4. Metodología y equipamiento

En este apartado se describe el equipo que se ha utilizado para recoger los datos mediante dos métodos, así como el procedimiento de medida para cada dispositivo empleado. El primero de ellos es el método de presión sonora, en el que únicamente se utilizan mediciones de presión para determinar el aislamiento acústico producido por una ventana. El segundo de ellos estima el aislamiento acústico a partir de medidas de intensidad sonora, las cuales se registran con la sonda p-u de Microflown y la sonda p-p de B&K. Todos los ensayos se han realizado en la misma cámara reverberante del laboratorio de ArquLAV, perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. La Figura 8 muestra las distintas instalaciones del laboratorio, de las cuales se han utilizado las de la parte de arriba de la figura, correspondientes a la cámara reverberante.



Figura 8. Instalaciones de ArquLAV. Arriba: Cámara reverberante. Abajo Izda.: Cámara de transmisión vertical. Abajo dcha.: Recinto para ensayos de barreras acústicas.[13]

Se han realizado un total de cuatro ensayos diferentes, los cuales se describen en este apartado:

- Método de presión sonora.
- Método de intensidad según norma con la sonda p-p de Brüel & Kjaer.
- Método de intensidad según norma con la sonda p-u de Microflown.
- Método de intensidad con la sonda p-u de Microflown utilizando el software VELO 5.

El elemento de ensayo es una ventana de doble aleta cerrada de 1260.0 x 440.0 mm. La Figura 9 es una imagen de la ventana descrita.



Figura 9. Ventana en torno a la que se realizan todos los ensayos.

4.1. Método de presión sonora

Este método de cálculo de aislamiento acústico viene definido en la Norma UNE-EN ISO 10140 y es la base con la que se comparan los métodos de intensidad que se expondrán más adelante. En este proyecto, y atendiendo a lo expuesto en el apartado 2.2, se ha optado por utilizar dos micrófonos en rotación constante y dos posiciones de fuente.

4.1.1. Equipo de medida

El equipamiento de medida ha sido proporcionado por ArquilAV, un laboratorio de acústica y vibraciones aplicadas a la edificación, medio ambiente y al urbanismo. En este laboratorio se han realizado todos los ensayos de este proyecto.

El objetivo de este método es medir el nivel de presión sonora en el recinto de emisión y el recinto receptor simultáneamente, y calcular el aislamiento producido por la ventana que actúa como elemento separador de ambos recintos. Para ello, se emplea una fuente omnidireccional, dos micrófonos y un software en el que se registrarán las mediciones.

Micrófono en continuo movimiento

ArquiLAV posee dos trípodes con un motor de rotación continua incorporado capaz de girar a tres velocidades diferentes. Estos trípodes incorporan un brazo extensible en cuyo extremo se puede anclar el micrófono con el que se harán las mediciones. El brazo tiene una extensión máxima de 1,5 m y la velocidad mínima de rotación que ofrece el motor es de 64 segundos por giro completo. Como la norma especifica que la longitud del barrido debe ser superior a un metro desde el centro de rotación y la duración del barrido superior a 15 segundos, el trípode puede configurarse para cumplir los requisitos sobradamente. La Figura 10 muestra la imagen de un micrófono con motor y trípode para realizar un giro constante.



Figura 10. Micrófono montado sobre trípode en el recinto receptor.

Fuente omnidireccional dodecaédrica

Para la emisión de ruido blanco se utiliza una fuente sonora con doce altavoces organizados en forma de dodecaedro montada sobre un trípode (Figura 11). Esta fuente de alta potencia proporciona un rango de frecuencias útil de 50 Hz a 5000 Hz y una potencia continua en banda ancha de hasta 300W. Además, cumple con numerosos



Figura 11. Fuente dodecaédrica.

estándares, entre los cuales, se encuentra la ISO 10140, utilizada en este proyecto. El modelo de fuente sonora utilizado es el OmniPower Modelo 4292-L.

PC con el software PULSE y unidad de adquisición de datos

A la hora de registrar las mediciones y analizarlas, se hace uso del software de Brüel & Kjaer: PULSE. Este software es un sistema de análisis orientado a sonido y vibraciones que viene acompañado de diferentes unidades de adquisición de datos. En este proyecto se utiliza la unidad PULSE Type 3560-C con hasta 4 canales de entrada, la cual es más que suficiente para el entorno en el que se han realizado las medidas.

4.1.2. Conexionado de equipos

A continuación, la Figura 12 muestra un diagrama en el que se incluyen los equipos mencionados y su interconexión.

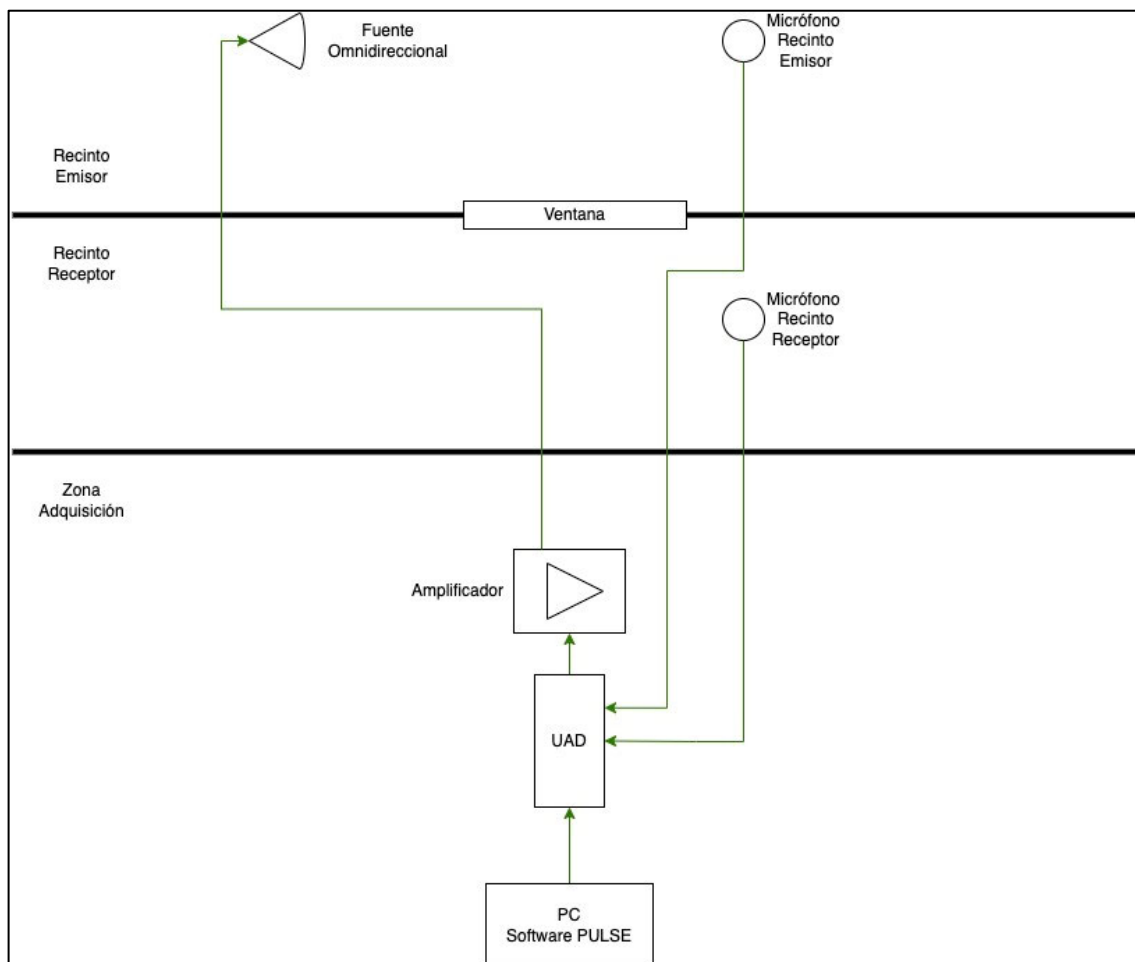


Figura 12. Diagrama de conexión de equipos utilizados para medir aislamiento acústico empleando el método de presión sonora de la Norma UNE-EN ISO 10140.

Atendiendo a la Figura 12, se configura el conexionado de los equipos de forma que en el recinto emisor haya una fuente que emita una señal de ruido blanco y un micrófono que recoja los niveles de presión sonora emitidos. En el recinto emisor se instala un

micrófono rotativo para registrar el nivel de presión sonora que se recibe tras la atenuación que produce la ventana. En la zona adquisición se necesita un ordenador con el software de PULSE y la unidad de adquisición de datos (UAD), a la cual se conectan los dos micrófonos y la fuente. Asimismo, entre la UAD y la fuente, se conecta un amplificador para que la fuente sea capaz de emitir un nivel razonablemente elevado.

4.1.3. Ejecución de medidas

Aplicando la Norma UNE-EN ISO 10140 para mediciones de aislamiento acústico, se han registrado los niveles de presión acústica de la siguiente forma:

Antes de medir se han dispuesto los equipos de emisión y medición, de forma que todos ellos respetan las indicaciones de separación mínima entre sí y con las paredes de la cámara reverberante. Así mismo, se han configurado los micrófonos en continuo movimiento para que hagan una rotación completa en 64 segundos y se ha preparado la plantilla de PULSE que se ha utilizado para realizar el ensayo. La Figura 13 muestra la disposición de instrumentación de los recintos emisor y receptor.

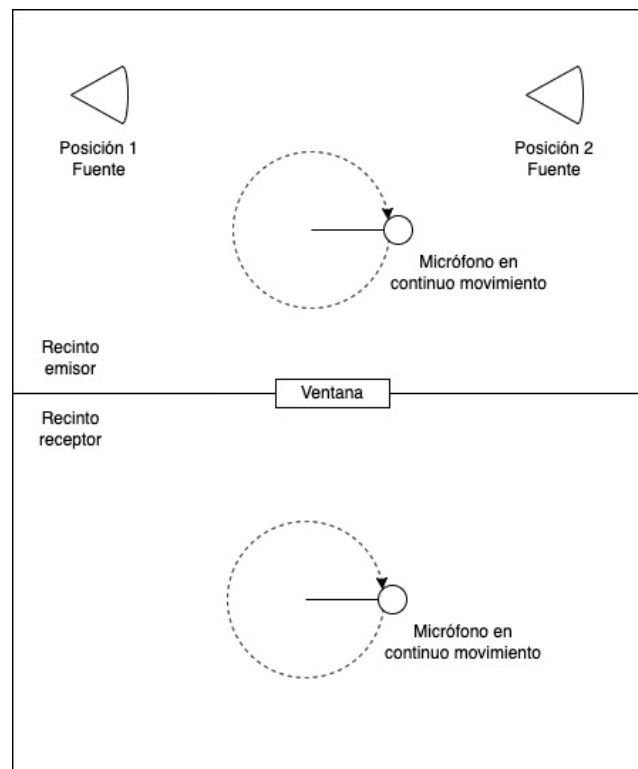


Figura 13. Diagrama de disposición de equipos para mediciones de aislamiento acústico en cámara reverberante.

Una vez configurado todo, se comprueba que ambos micrófonos se hace una verificación de los canales de medida utilizando un calibrador sonoro que emite un tono de referencia de 94 dB a 1 kHz, y se hace una medición de ruido de fondo antes de comenzar el ensayo tal y como dicta la norma. Tras esto, se obtienen las medidas de tiempo de reverberación siguiendo el método del ruido interrumpido, el cual indica que, para cada posición de fuente, son seis las medidas que se deben registrar para cada banda

de frecuencia como mínimo. Con estos datos, se puede calcular posteriormente el área de absorción acústica.

A continuación, se realizan dos tandas de medidas con la fuente en la posición 1. En ambas tandas la fuente emite ruido blanco en el recinto emisor durante 64 segundos, que es el tiempo de promediado que se ha configurado en PULSE para ambos micrófonos. Una vez registradas esas mediciones, se cambia la fuente a la posición 2 y se repite el proceso. Finalmente, se vuelven a hacer medidas de ruido fondo y concluye el ensayo.

4.2. Método de intensidad con la sonda de Brüel & Kjaer

A diferencia de la sonda p-u de Microflown, la sonda p-p de B&K sí se contempla como instrumento de medida estandarizado por la Norma UNE EN-ISO 15186, así como los separadores que se han utilizado, ya que reciben una mención en la norma.

4.2.1. Equipamiento de medida

El equipamiento es el mismo que en el apartado 4.1, intercambiando el micrófono del recinto receptor por la sonda p-p de B&K.

4.2.2. Conexión de equipos

El conexionado de este ensayo es similar al del método de presión; ahora el micrófono que captaba la presión sonora en el recinto receptor intercambia papeles con la sonda p-p para medir la intensidad en recepción. La Figura 14 muestra el diagrama de conexionado de este ensayo.

Al igual que en el ensayo del método de presión, el ordenador envía la señal medida a la unidad de adquisición de datos y ésta la hace llegar a la fuente omnidireccional pasando por el amplificador. Al mismo tiempo, el micrófono recoge los niveles de presión sonora y la sonda los de intensidad sonora para ser recibidos la unidad de adquisición de datos. Por último, la UAD se conecta al ordenador para procesar los datos en el software de PULSE.

4.2.3. Ejecución de medida

Las mediciones se han hecho por tandas debido a que ha que hay que tomar medidas con los diferentes separadores que se pueden colocar entre los dos micrófonos de la sonda.

En primer lugar, se calibra la sonda introduciéndola en un calibrador especial preparado para introducir la sonda con el separador de 12 mm. Este calibrador emite un ruido blanco que la sonda capta y se registra en PULSE para que la plantilla del software adapte los niveles en banda a valores calibrados (Figura 15). La Tabla 2 muestra los valores del índice de presión-intensidad residuales obtenidos en calibración. También se comprueba que el micrófono en el recinto emisor está calibrado con un pistófono. A continuación, se prepara la fuente en la posición 1 y se activa el motor del micrófono para que comience a rotar de forma continua. Lo siguiente es comenzar con las diferentes

tandas de medidas. En este ensayo se dispone de tres separadores: 6 mm, 12 mm y 50 mm. Con cada uno de los separadores se hacen dos medidas; una por barrido. Con cada barrido se registra el nivel de presión sonora captado por el micrófono en el recinto emisor. La plantilla está preparada para que, al darle a medir, se active la fuente y se recojan los datos de la sonda y del micrófono al mismo tiempo. Una vez terminada esta ronda de mediciones se cambia la fuente a la posición 2 y se repite el proceso. Por último, desde PULSE se extraen los datos de las gráficas en bandas de tercio de octava tanto de presión como de intensidad sonora a Excel para un análisis posterior.

Tabla 2. Índices de presión-intensidad residuales.

F[Hz]	P-I Index [dB]
100,00	16,90
125,00	19,52
160,00	19,93
200,00	24,17
250,00	25,89
315,00	28,94
400,00	32,94
500,00	30,31
630,00	29,38
800,00	28,48
1000,00	25,61
1250,00	24,69
1600,00	23,89
2000,00	23,47
2500,00	23,97
3150,00	25,30
4000,00	25,59
5000,00	29,80

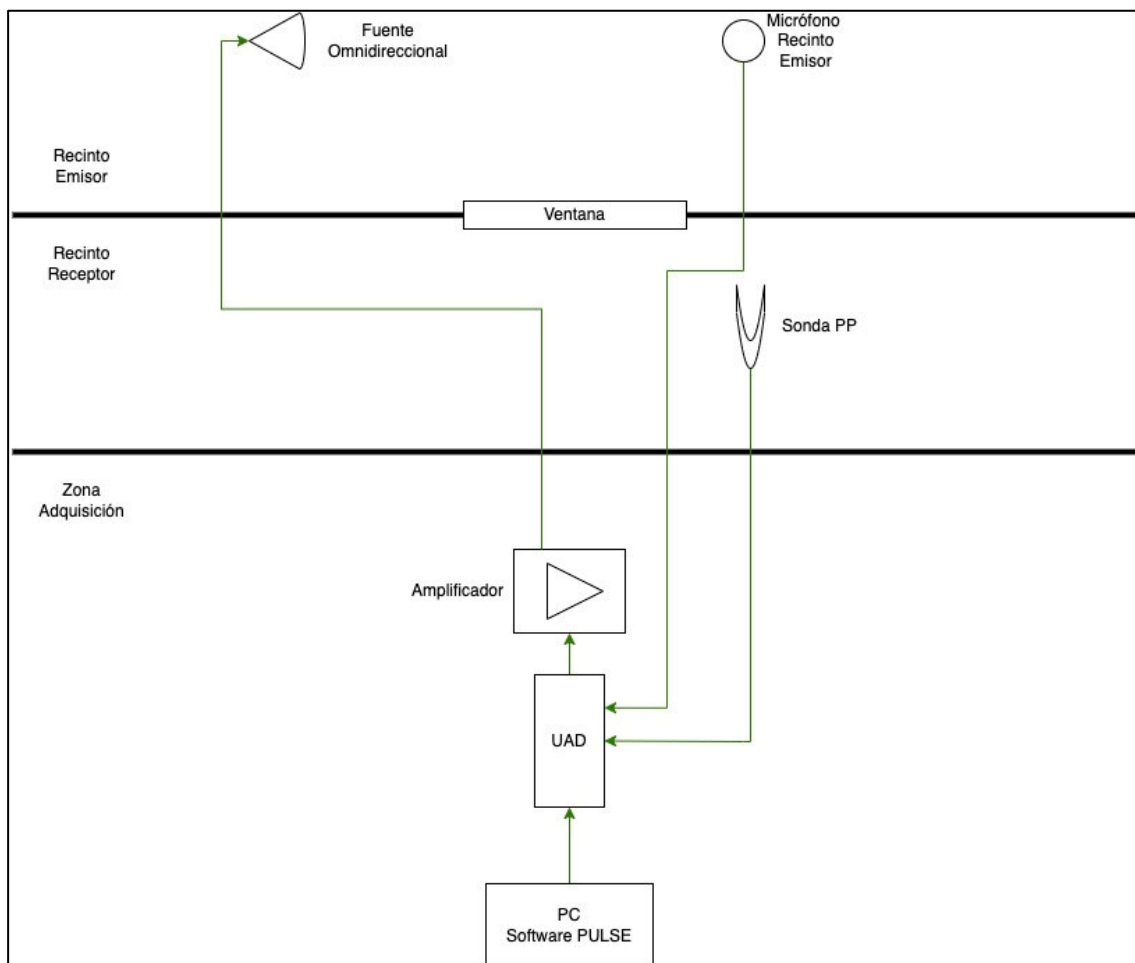


Figura 14. Diagrama de conexión del ensayo de aislamiento acústico empleando intensidad sonora con la sonda PP de Brüel & Kjaer.



Figura 15. Calibrador para una sonda p-p de Brüel & Kjaer [14].

Al igual que con la sonda de Microflown, hay que tener cierta destreza a la hora de hacer mediciones con la sonda p-p y los problemas encontrados en el momento de medir son muy similares. Partiendo de la base de que el eje que une los micrófonos enfrentados de la sonda debe ser perpendicular a la superficie de medida, es sencillo que se produzcan ligeras variaciones en la inclinación del eje. De la misma forma, tratar de mantener un

desplazamiento paralelo a la superficie para la realización del barrido, es probable que produzca una trayectoria irregular; como sucede con la sonda de Microflown.

4.3. Método de intensidad con la sonda p-u de Microflown

La sonda p-u de Microflown no está contemplada como instrumento de medida estandarizado en la Norma UNE-EN ISO 15186 [2] como sí lo está la sonda p-p de B&K. Como el objetivo de este proyecto es determinar si los resultados obtenidos con la norma de presión sonora y la norma de intensidad sonora utilizando la sonda p-u de Microflown aportan resultados comparables a los que arroje el ensayo con la sonda p-p de Brüel & Kjaer, y dado que la sonda p-u también utiliza la intensidad sonora para medir, se seguirá la norma de intensidad sonora anteriormente mencionada.

4.3.1. Equipo de medida

Para este ensayo se mantiene la misma fuente sonora en el recinto emisor y se retira la del recinto receptor. También se mantiene la unidad de adquisición y el software de PULSE. Esto es debido a que el software VELO 5 únicamente se utiliza para registrar las medidas para analizarlas y procesarlas. Por tanto, se incluye un nuevo PC con el software de Microflown.

Sonda p-u

La sonda p-u de Microflown es el elemento encargado de registrar las medidas en cada punto del plano paralelo a la ventana. Con ella se realizarán los barridos tal y como se indica en la Norma 15186. Modelo: ½" PU Regular, Sound Intensity Probe.

Preamplificador

Microflown Technologies ofrece un preamplificador que alimenta todas las sondas de su catálogo amplificando la presión sonora y la velocidad de las partículas en las dos salidas BNC que contiene a nivel de línea. De esta forma, no es necesario ajustar el acondicionador de señal con la sonda para que estén calibrados. Modelo: MFPA-2.



Figura 16. Preamplificador MFPA-1 de Microflown. [15]

Sistema de adquisición

Para recoger los datos de las mediciones, Microflown tiene incluido en catálogo un sistema de adquisición de 4 canales de línea, trigger externo y dos salidas (de línea y amplificada). Modelo: SCOUT V2 | 4 Channel DAQ.



*Figura 17. Sistema de adquisición Scout V2 de Microflown.
[16]*

Cámara

La cámara es el instrumento a través del cual, se asociarán los valores registrados con la posición de la sonda p-u sobre el plano paralelo a la ventana.

PC con software VELO 5

Para procesar las medidas se necesita el software nativo de Microflown, el cual comanda todas las etapas del ensayo, desde la adquisición hasta la exportación de resultados; pasando por una fase de procesado, en la cual se analiza el video grabado y la medida almacenada en cada punto del barrido.

4.3.2. Conexionado de equipos

El conexionado utilizado para el ensayo anterior mantiene su esquema hasta la fuente omnidireccional. Al nuevo ordenador con VELO 5 se conecta el sistema de adquisición SCOUT V2, seguido del preamplificador MFPA-2 que devolverá las medidas recopiladas por la sonda p-u conectada a él con unos niveles suficientemente calibrados para manejarlos de forma correcta en las siguientes fases de análisis y procesado. Por tanto, el flujo de acciones de la Figura 18 es el siguiente: El ordenador con el software PULSE tendrá la función única de enviar una señal de ruido hasta la fuente omnidireccional pasando por la UAD y el amplificador. Por otro lado, la sonda p-u es la encargada de registrar esas mediciones durante el barrido mientras la cámara va captando en video dicho barrido. Esas medidas se calibrarán en el preamplificador MFPA-2 y llegarán al ordenador a través del sistema de adquisición SCOUT V2 y quedarán anotadas en el software VELO 5 junto con la información del video. La Figura 18 muestra el conexionado de los equipos en este ensayo.

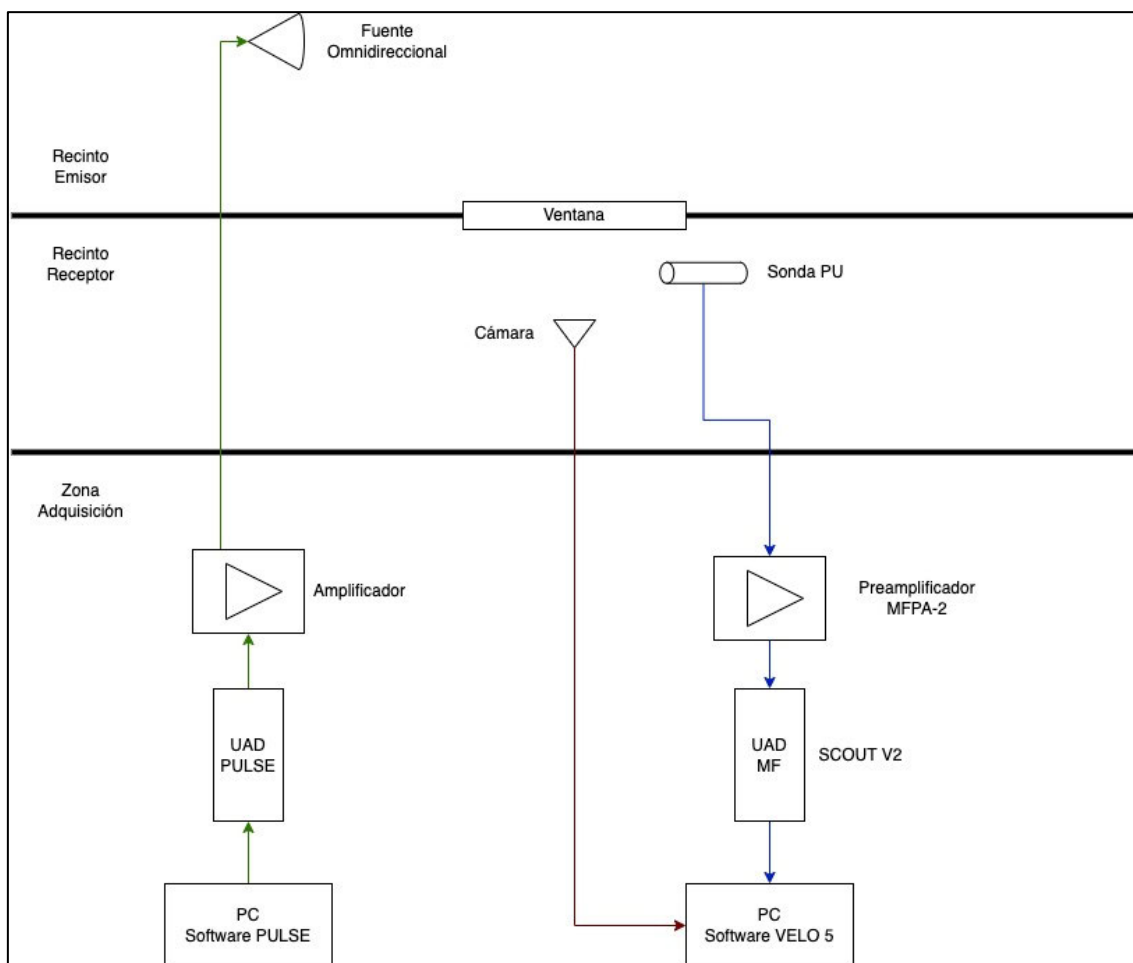


Figura 18. Diagrama de conexión del ensayo de aislamiento acústico con la sonda PU de Microflown.

4.3.3. Ejecución de medidas

Como se ha descrito anteriormente, el ensayo con la sonda p-u de Microflown se ha realizado siguiendo las indicaciones de la Norma UNE-EN ISO 15186.

En primer lugar, y debido a limitaciones con la longitud de los cables, se introduce el ordenador contenedor del software VELO 5 a la cámara reverberante. Este ordenador, es al que van conectados el amplificador, el sistema de adquisición de medidas y la cámara. Hay que recordar que la sonda no se conecta directamente al ordenador, sino que se conecta al preamplificador.

El siguiente paso tiene como objetivo configurar el software. Nada más abrir el programa, éste te da a elegir entre las 6 diferentes aplicaciones de la Figura 19.

En este proyecto y, en especial, en este ensayo, la opción que se debe seleccionar es la primera: “Scan & Paint” cuyo funcionamiento se ha descrito en el apartado 2.3.2. La ventana que se abre a continuación es una pestaña de configuración (“HW Setup”), en la cual se deben ajustar los parámetros para que correspondan con las condiciones de medida.

En la sección de “Global Settings” de la figura 20 se configura dónde se almacenan las medidas y el proyecto sobre el que se está trabajando. También se ajustan los

parámetros de presión atmosférica, humedad relativa y temperatura ambiente. En este proyecto, la temperatura de medición fue de aproximadamente 16°C y la presión atmosférica de 939,2 hPa. En la sección inferior (“Signal Acquisition Settings”) se ajustan las entradas y salidas analógicas, la imagen de la cámara, un control remoto (si existe) y un dispositivo de seguimiento para medidas en las que se necesite almacenar datos en un entorno tridimensional. En la parte derecha de la pestaña se encuentra la base de datos de sondas y la configuración de éstas. La base de datos permite almacenar información acerca de la sonda que se está utilizando, como la sensibilidad en términos de presión sonora como de velocidad de partícula. Estas sensibilidades son las indicadas en las especificaciones de la sonda: 65 mV/Pa y 30 V /(m/s) respectivamente [11]. La última sección de esta pestaña se encarga de seleccionar el modelo de sonda p-u que se está utilizando de entre las disponibles en la base de datos de sondas. Con esta pestaña configurada se procede a realizar las medidas utilizando la pestaña siguiente: “Capture”.

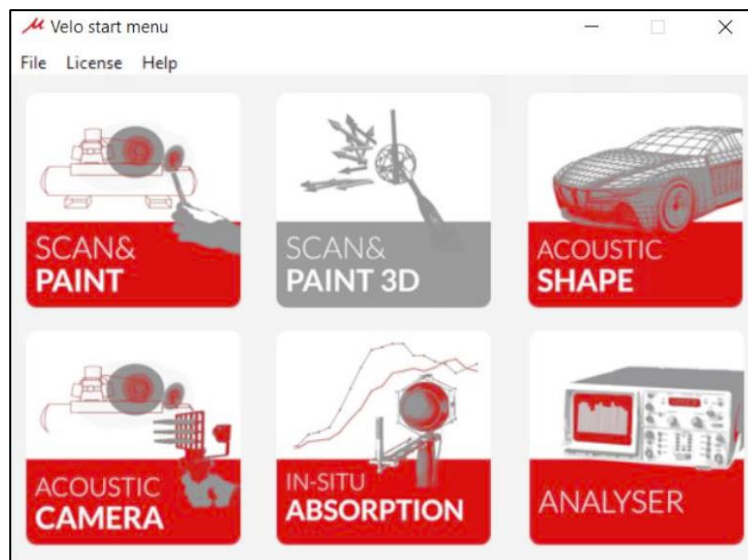


Figura 19. Menú de inicio de VELO 5.

En la ventana de la Figura 21 es donde se controla todo el proceso de medición, el cual se explica más adelante, una vez descrita la funcionalidad de cada sección. En la primera de ellas (“Video monitor”), cuando la cámara está conectada, se muestra el plano que está captando. De esta forma, se previsualiza la toma sobre la que se hará el postprocesado. A la derecha se encuentra el analizador (“Analyser”) que, cuando la sonda está correctamente conectada al preamplificador, muestra en tiempo real el espectro de la presión que recibe del sistema de adquisición. En la parte inferior de la pestaña se encuentra la monitorización de nivel (“Level Monitor”) que, como su propio nombre indica, monitoriza el nivel que está recibiendo la sonda seleccionada en ese momento. Por último, en la sección de controles (“Controls”) se puede renombrar el archivo de la medida que se vaya a realizar cuando se pulse el botón “Start” y controlar la duración de la medida con el cronómetro implícito en la sección.

Una vez comprendido cómo se utiliza esta pestaña, se comienza a medir. Si todo está correctamente conectado y configurado, el “Video monitor” debe mostrar la imagen de

la ventana que más convenga para el posterior análisis; a su vez, el analizador de la sección “Analyser” debe reaccionar a, por ejemplo, un tono en tiempo real. Si esto es así, para comenzar a medir basta con hacer *click* en “Start” o, en su defecto, presionar la barra espaciadora del teclado. El contador se pondrá en marcha y el programa empezará a registrar las medidas de la sonda mientras graba en vídeo lo que capta la cámara. Sobra decir que, aunque la sonda no se encuentre dentro del plano de la cámara, el software sigue registrando los datos de la sonda. Por ello, para obtener unos resultados precisos y fiables, se recomienda aprovechar una pequeña latencia que ocurre entre la pulsación de “Start” y el inicio de medición del programa. Cabe destacar que la situación acompañaba debido a que el ordenador se encontraba en el interior de la cámara reverberante y supone dos pasos situarse en posición de inicio de coreografía. Para terminar la medición se mantiene la sonda dentro del plano de cámara y se presiona la barra espaciadora.

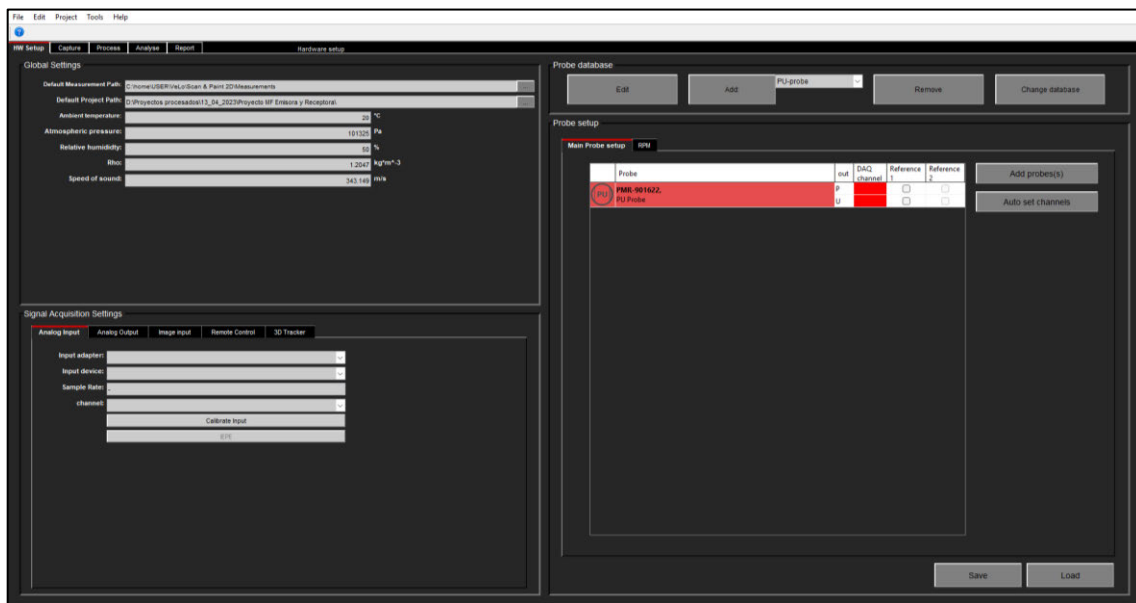


Figura 20. Pestaña de configuración de parámetros en VELO 5.

Las mediciones se han realizado siguiendo la Norma UNE-EN ISO 15186-1 [2]. Se ha hecho una medición de cada barrido por separado con una duración de medida siempre superior a 120 segundos y a una distancia de separación aproximada de 0,2 m. El ensayo se ha dividido en dos bloques de medidas.

El primer bloque se ha hecho en el recinto receptor con la fuente siempre emitiendo en el emisor. En total se han hecho 10 medidas, que se agrupan cada 2 (barrido horizontal y barrido vertical). Al terminar las mediciones se ha apagado la fuente y se ha pasado el equipamiento al recinto emisor.

Para registrar los datos de emisión se ha seguido el mismo procedimiento que en recepción. Con la fuente emitiendo continuamente, se hacen 10 mediciones, una por barrido; agrupándose en pares de 2. Además, se han realizado dos pares de medidas adicionales para ver cómo influye la distancia a la superficie a la que se sitúa la sonda. El primer par de barridos se han hecho a 0,5 m de distancia y el segundo a 1 metro.

En todas las coreografías de medición se ha tenido en consideración los puntos débiles de un ensayo a mano alzada con la sonda p-u comentados en el apartado 2.3.2:

- Mantener el plano de medida paralelo a la superficie de medida.
- Mantener el eje de directividad perpendicular a la superficie de medida.
- Tantas coreografías como rondas de medida.



Figura 21. Pestaña de medición del software VELO 5.

Uno de los principales inconvenientes que se han encontrado en el momento de medir ha sido la pérdida de visión espacial horizontal al tratar de mantener el plano de medida paralelo a la superficie. Como consecuencia de esto, la trayectoria de los barridos sale especialmente deformada debido a que uno no es perfectamente consciente de la distancia que hay entre la sonda y los ojos. Aun así, tras varios intentos, se consigue masterizar, en cierto grado, el movimiento hasta que resulta un barrido lo suficientemente definido. Otro gran inconveniente fue aplicar la teoría descrita en el apartado 2.5.1, en el que, para tratar de conseguir una velocidad constante, se propone hacer el cálculo de cuantos barridos son necesarios en 120 segundos para recorrer de manera uniforme toda la superficie. En este caso se calcularon 8 barridos verticales y 11 horizontales en ese tiempo para que la velocidad fuese constante y estuviese dentro de los límites establecidos por la norma. Aunque la teoría está clara, resulta complicado mantener el ritmo. Aunque se definan puntos de referencia en la ventana, siempre aparece la posibilidad de adelantarse o retrasarse al llegar a uno de ellos, lo cual deriva en haber terminado el barrido antes de los 120 segundos, y tener que barrer la superficie en otro sentido hasta cumplir con el tiempo. Esto último no supone un problema grave, ya que la única consecuencia es que, en algunos puntos de la superficie, el software realizará un promediado con más datos que otros puntos por los que no haya repetido mediciones la sonda.

Una vez terminadas las mediciones en el recinto emisor, se apaga la fuente y se da por concluido el ensayo. El siguiente paso es procesar las medidas con el software de

Microflow, en el cual se combinan el video y los datos de la sonda. Todo esto se hace en la pestaña “Process”. La Figura 22 presenta esa pestaña.

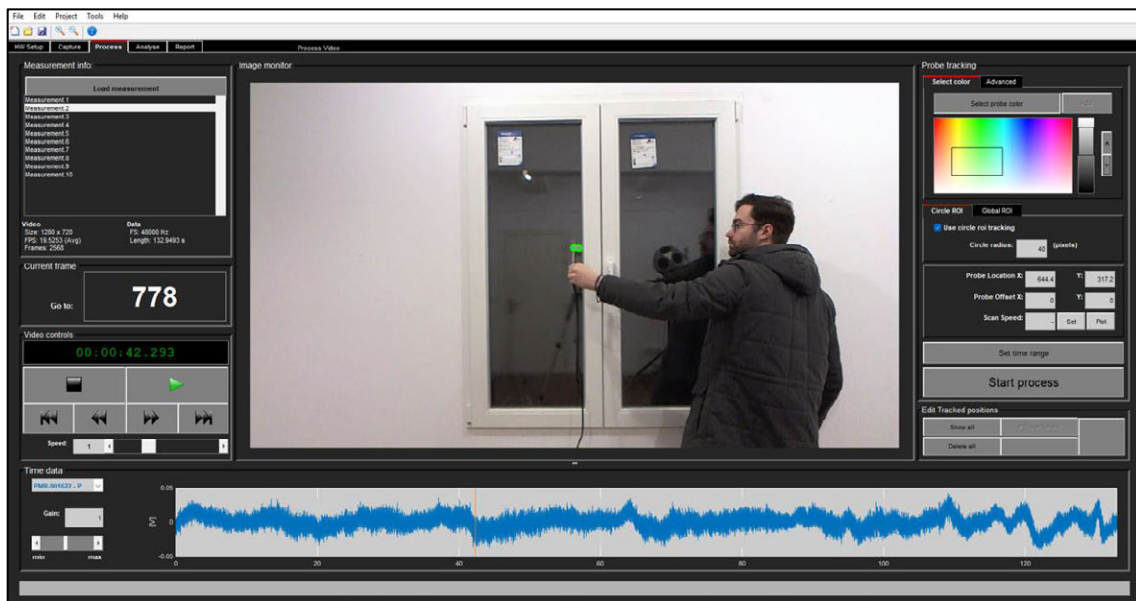


Figura 22. Pestaña "Process" del software VELO 5 de Micrflow.

En la primera sección de la izquierda (“Measurement info:”) se cargan los archivos de las medidas desde la carpeta en la que se hayan guardado y se da una breve descripción de las características del video de la medida seleccionada. La sección siguiente (“Current frame”) indica el número de fotograma en el que se encuentra el video mientras se procesa. Más abajo está la sección de control de video, que no es más que una interfaz estándar de manipulación de video con ajuste de velocidad de reproducción. En la parte inferior de la pestaña se encuentra la información de línea de tiempo. En el eje Y se representa la amplitud del parámetro de la sonda que se seleccione en “Time Data” y en el eje X el tiempo en segundos. En el rectángulo central se monitoriza el video sobre el que se van a ajustar los parámetros de las secciones de la derecha. La sección “Probe Tracking” se encarga de seguir la marca de color que se pone a la sonda para que el software pueda asociar correctamente el valor que ha registrado la sonda con la posición de la misma en el plano. De este parámetro se puede ajustar el radio de la circunferencia que limita dónde el programa debe buscar el color que se ha seleccionado y el *offset* introducido por la cinta de color. Este *offset* se produce porque la cinta verde está colocada ligeramente por debajo de los hilos calientes que registran las medidas.

Una vez cargados los archivos de medición se selecciona uno de ellos y se hace *click* en “Select probe color”. Cuando se hace esto, el cursor cambia de forma y te permite seleccionar el color de un píxel del video. Con las flechas de la derecha se puede configurar para abarque más tonos de verde y un rango más amplio de luminancia. Lo siguiente es compensar el *offset* de la cinta de color. Tras algunas pruebas, el valor del *offset* que se introdujo fue de -10 píxeles. Hecho esto, se hace *click* en “Start process” y se espera a que el programa procese la medida. Cuando termine de procesar, haciendo

click en “Show all” en la sección “Edit Tracked position” se pueden visualizar los puntos procesados por el programa.

El último paso de la extracción de datos tiene lugar en la pestaña “Analyse”, que se muestra en la Figura 23. En esta pestaña se analizan los resultados que han quedado procesados en la anterior. En la primera sección (“Process Time data”) se selecciona el método de análisis que se quiere utilizar. En este ensayo han sido los métodos “Grid” y “Transmission Loss”. “Grid” es el resultado de promediar los puntos distribuidos en cuadrantes en forma de rejilla. El método “Transmission Loss” calcula directamente el aislamiento acústico introduciendo las medidas recogidas en el recinto emisor por un lado y las del recinto receptor por otro, tal y como muestra la Figura 24.

En la sección “Position data” se ofrece la opción de mostrar las posiciones de los datos que se han procesado sobre la superficie de medida. Esto resulta muy útil cuando se desea conocer cómo ha repartido el software las ubicaciones de promediado sobre el plano de la cámara. En “Process Frequency Data” se establecen los límites que el software debe analizar para luego mostrar el mapa de colores en cada frecuencia. Por último, la sección “Controls” permite modificar el rango de frecuencias que se representan en el mapa de colores de la ventana “Measurement Analysis”. Para extraer los datos hay que dirigirse a la barra superior de herramientas, en la que se debe discernir cómo se desea que vengan representados los datos en las gráficas.

Por tanto, el primer paso en esta pestaña es cargar la medida y seleccionar el método que se desea emplear. A continuación, se selecciona el área del barrido que se quiere analizar y se configura la barra de herramientas superior para que se represente en dB y tercio de octava. Después se debe seleccionar del desplegable la magnitud que se desea extraer. Para este proyecto, los necesarios son “Intensity” y “Pressure”; aunque el software también ofrece la opción de extraer los datos de velocidad de las partículas mediante la opción “Velocity”. Por último, se hace *click* en “Process área” y aparecerá una ventana emergente con la gráfica adaptada a la configuración establecida. Esa gráfica se extrae a Excel y se repite el proceso con cada medida.

Con todos los datos extraídos se puede hacer un estudio en Excel del aislamiento acústico siguiendo las indicaciones y terminología de la Norma UNE-EN ISO 15186[2].

Adicionalmente, se ha aprovechado el montaje para hacer un ensayo en el que la presión sonora en el recinto emisor se ha medido por repetibilidad con un micrófono en continuo movimiento en dos posiciones de fuente en lugar de hacerlo con la sonda como se ha explicado anteriormente. El motivo de esto es poder comparar las diferencias existentes en la reacción de cada sonda si se emplea el mismo método en cada una de ellas.

Para lograr la condición repetibilidad se han hecho 5 medidas por posición de fuente, cortando la emisión entre medición y medición. Con estos datos, se obtiene el promedio de la presión en el recinto emisor y se procede a medir la superficie del elemento de ensayo en el recinto receptor con el software VELO 5 y de igual modo que el ensayo anterior.

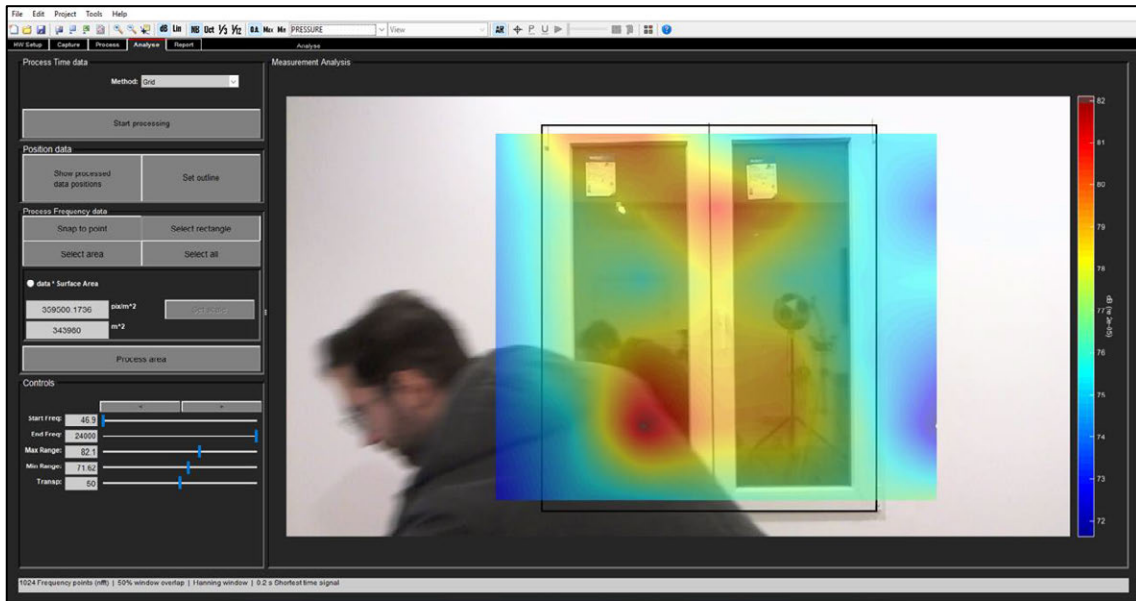


Figura 23. Pestaña "Analyse" del software VELO 5 de Microflown.

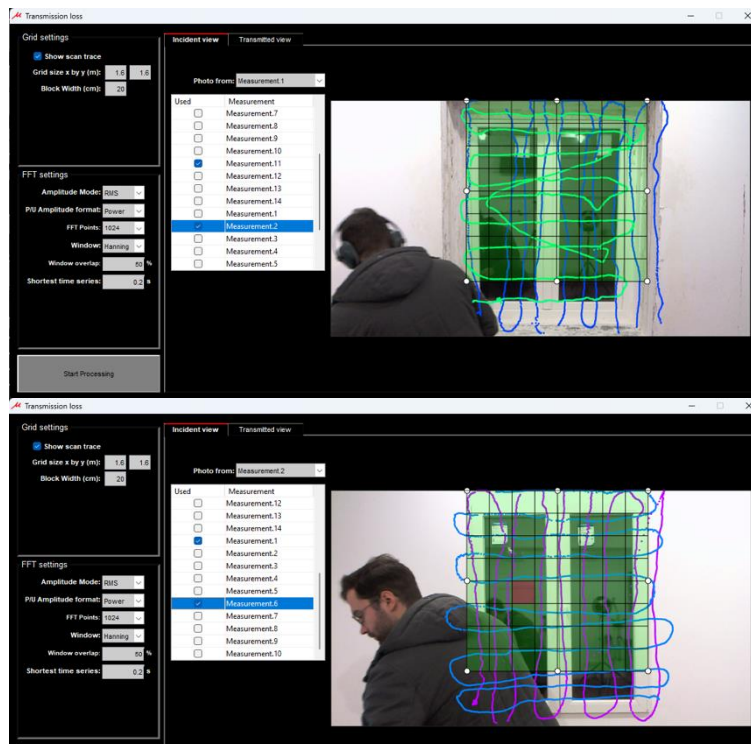


Figura 24. Introducción de datos en el método "Transmission Loss" para calcular el aislamiento acústico con el software VELO 5 de Microflown.

5. Análisis de resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos, comparando la terminología que ambas normas establecen que son comparables entre sí. En el caso de del método de cálculo de aislamiento acústico a partir de medidas de presión sonora el parámetro utilizado es el **índice de reducción acústica, R** ; y en el caso del método empleando intensidad sonora es el **índice de reducción sonora intensimétrico, R_I** .

5.1. Cálculo de R

Comenzando por el índice de reducción acústica, lo primero que se debe comprobar es que el ruido de fondo cumple con lo descrito en la norma, la cual dice que el ruido de fondo debe ser al menos 6 dB inferior al nivel de señal combinada con el ruido de fondo y preferiblemente inferior a 15 dB. En la Tabla 3 se presentan los valores de las medidas registradas en la totalidad del ensayo en bandas de tercio de octava.

Tabla 3. Promediado de niveles del ensayo de aislamiento acústico utilizando presión sonora.

F [Hz]	Promedio Emisión, L_{pe} [dB]	Promedio Recepción, L_{pr} [dB]	Promedio ruido de fondo, L_b [dB]
100	95,0	50,9	21,7
125	95,0	50,6	18,0
160	94,2	55,7	18,1
200	93,9	60,2	21,9
250	95,2	64,1	16,0
315	94,5	56,1	15,3
400	94,2	52,0	15,9
500	91,9	49,6	19,5
630	90,1	47,1	10,3
800	89,0	43,1	9,3
1000	87,5	39,7	15,7
1250	88,4	39,4	5,6
1600	89,3	38,9	6,0
2000	88,4	39,5	5,0
2500	87,9	41,0	6,4
3150	88,4	41,4	8,3
4000	87,7	37,0	8,0
5000	82,1	27,4	7,2

La primera columna promedia el nivel de emisión en el recinto emisor en ambas posiciones de fuente, de igual manera sucede con la segunda columna en el recinto emisor. La última columna promedia los niveles de ruido de fondo al comienzo y al final

del ensayo. Para visualizar cómo están relacionados estos valores se presenta la gráfica de la Figura 25.

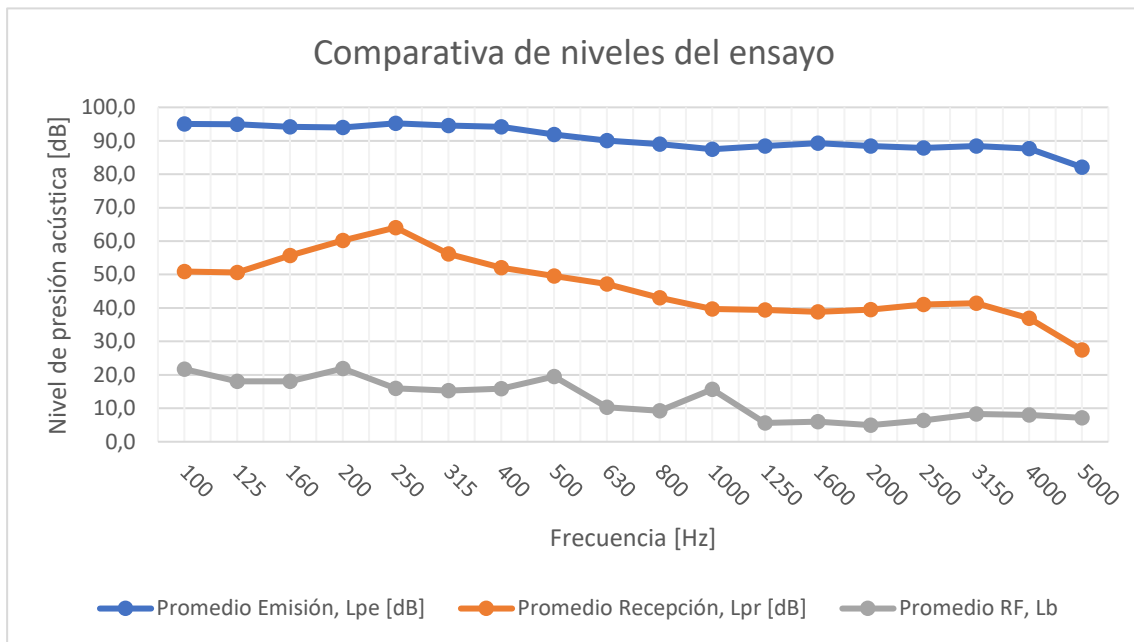


Figura 25. Comparativa de resultados de los promedios de niveles del ensayo de aislamiento acústico empleando presión sonora.

En ningún caso, la diferencia de nivel en emisión y nivel en recepción con el ruido de fondo es inferior a 6 dB, es más, en todas las bandas la diferencia es superior a 15 dB, por lo que no es necesaria ninguna corrección por ruido de fondo. La diferencia de nivel existente en cada banda se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Diferencia de nivel de ambos recintos con el ruido de fondo.

F[Hz]	L _{pe} - L _b [dB]	L _{pr} - L _b [dB]	F[Hz]	L _{pe} - L _b [dB]	L _{pr} - L _b [dB]
100	73,3	29,2	800	79,7	33,8
125	76,9	32,6	1000	71,8	24,0
160	76,2	37,7	1250	82,7	33,7
200	72,1	38,3	1600	83,3	32,9
250	79,2	48,1	2000	83,4	34,5
315	79,3	40,9	2500	81,5	34,6
400	78,3	36,1	3150	80,1	33,1
500	72,4	30,0	4000	79,7	28,9
630	79,8	36,9	5000	75	20,3

Lo siguiente que se debe calcular es el **área de absorción acústica, A**. Para ello se ha medido el tiempo de reverberación, el cual se representa en la Figura 26.

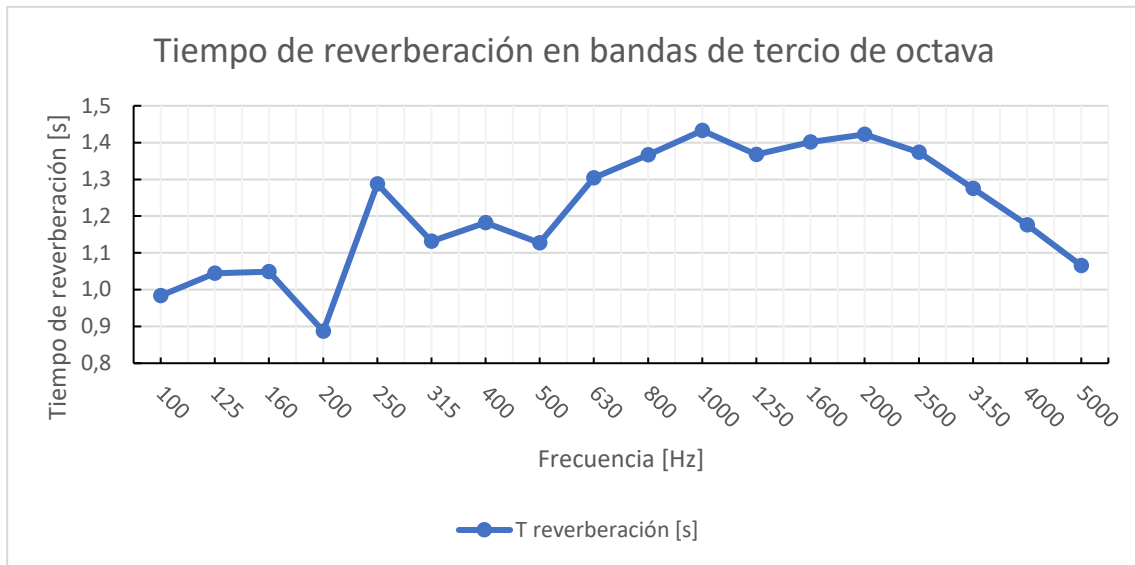


Figura 26. Tiempo de reverberación.

Con estos datos y el volumen del recinto receptor, se calcula el área de absorción acústica mediante la fórmula:

$$A = \frac{0,16V}{T} \quad (14)$$

Siendo V volumen del recinto emisor en m³. V = 61,40 m³. T tiempo de reverberación.

La Tabla 5 muestra el área de absorción acústica obtenida a partir de la ecuación (14):

Tabla 5. Área de absorción acústica en bandas de tercio de octava.

F [Hz]	T reverberación [s]	A [m ²]	F [Hz]	T reverberación [s]	A [m ²]
100	0,98	9,99	800	1,37	7,19
125	1,04	9,41	1000	1,43	6,86
160	1,05	9,37	1250	1,37	7,19
200	0,89	11,07	1600	1,4	7,01
250	1,29	7,63	2000	1,42	6,91
315	1,13	8,68	2500	1,37	7,15
400	1,18	8,31	3150	1,27	7,71
500	1,13	8,71	4000	1,18	8,35
630	1,3	7,53	5000	1,07	9,22

Tras estos cálculos, se puede obtener el índice de reducción acústica. En cuanto a la incertidumbre de medida se utilizan las indicadas en el Caso C del apartado 7.2 de la Norma UNE-EN ISO 12999-1:2021 [15]. Esta norma define las incertidumbres de medición de aislamiento acústico de edificios. Esta decisión se debe a que el Caso C de ese apartado hace referencia a las incertidumbres interlaboratorio en condiciones de repetibilidad. Esto significa que el estudio se ha realizado siguiendo el mismo procedimiento, sistema y localización en todos los ensayos. La Tabla 6 muestra los resultados del cálculo anterior.

Tabla 6. Obtención del índice de reducción acústica y su incertidumbre.

F [Hz]	R [dB]	Incertidumbre Tabla 2 Caso C Norma 12999-1: 2020 [dB]	F [Hz]	R [dB]	Incertidumbre Tabla 2 Caso C Norma 12999-1: 2020 [dB]
100	36,6	1,4	800	39,9	0,6
125	37,1	1,2	1000	42	0,6
160	31,3	1	1250	43	0,6
200	25,8	0,9	1600	44,5	0,6
250	24,9	0,8	2000	43	0,6
315	31,5	0,7	2500	40,9	0,6
400	35,5	0,6	3150	40,7	0,6
500	35,5	0,6	4000	44	0,6
630	36,7	0,6	5000	47,5	0,6

La Figura 27 muestra el índice R, junto con la incertidumbre:

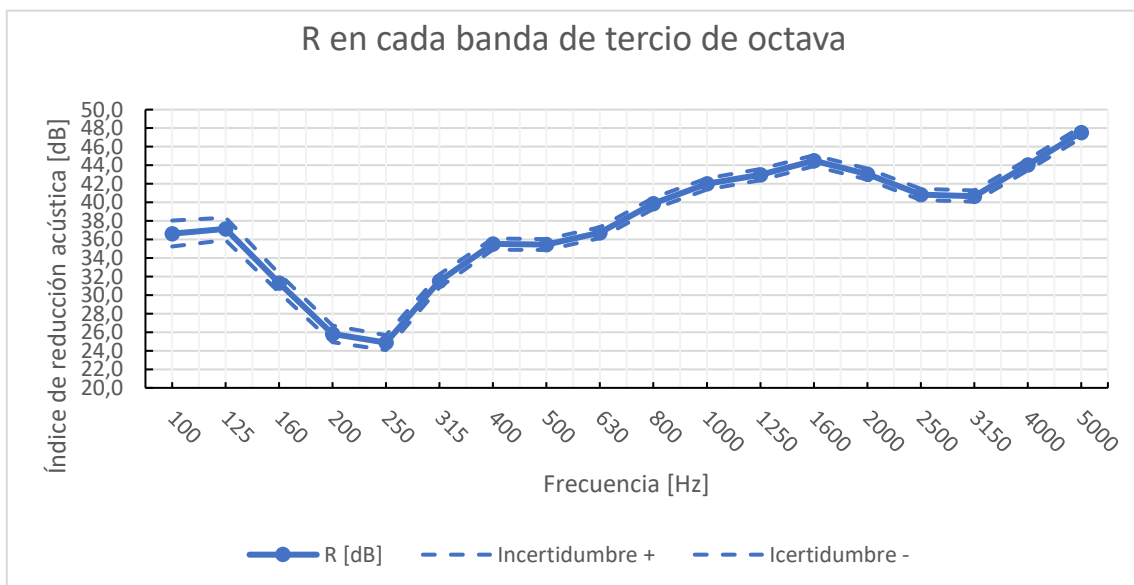


Figura 27. Índice de reducción acústica en función de la frecuencia.

Este ensayo muestra un mayor aislamiento por parte de la ventana en frecuencias medias altas y poco aislamiento en frecuencias bajas, especialmente en las comprendidas entre las bandas de 160 Hz y 315 Hz, donde cae abruptamente.

5.2. Cálculo de R_1 con la sonda p-u de Microflown

Presión en recinto emisor medido con la sonda p-u (método no estandarizado)

Uno de los parámetros con el que se va a comparar el método de presión sonora. Para obtenerlo se necesita el nivel medio de la presión acústica en el recinto emisor y el nivel medio de intensidad sonora en la sala receptora. A diferencia del método de presión, donde los promedios se calculan energéticamente, la norma de cálculo de aislamiento acústico empleando intensidad indica que el promediado de los barridos de las medidas deben de hacerse aritméticamente. La Tabla 7 muestra los niveles de presión en banda promediados tras medirlos con la sonda p-u en el recinto emisor.

En la obtención de los niveles de la Tabla 7 hay ciertas bandas (200 Hz, 250 Hz y 315 Hz) que han presentado problemas en algunas mediciones. A la hora de analizar los barridos en Excel, la diferencia de nivel en los barridos de dos medidas ha sido superior a 1 dB. La norma dice que, si sucede esto, la medida debe desecharse. No obstante, como únicamente ha sucedido en estas tres bandas a lo largo de todo el ensayo y la diferencia no ha sido superior a 1,5 dB en ningún caso, se han incluido en el promedio aritmético. La Tabla 8 muestra las bandas en las que ha sucedido esto.

Tabla 7. Nivel de presión sonora de emisión.

F [Hz]	Lp ₁ [dB]	F [Hz]	Lp ₁ [dB]
100	92	800	83,7
125	92,9	1000	82,3
160	93,6	1250	82,7
200	93,4	1600	83,8
250	92,5	2000	83,2
315	91,6	2500	82,9
400	89,5	3150	83,6
500	86,5	4000	82,7
630	85,2	5000	76,8

Tabla 8. Niveles de presión acústica medidos en la sala emisora. Las bandas donde la diferencia de nivel es superior a 1 dB están marcadas en rojo.

F [Hz]	L _p Medida 1 [dB]		L _p Medida 5 [dB]		F [Hz]	L _p Medida 1 [dB]		L _p Medida 5 [dB]	
	Barrido 1	Barrido 2	Barrido 1	Barrido 2		Barrido 1	Barrido 2	Barrido 1	Barrido 2
100	91,7	92,2	92,1	92,1	800	83,9	83,9	83,4	83,7
125	92,5	93,1	93	92,8	1000	82,4	82,4	82,2	82,4
160	93	93,7	94	93,4	1250	83,2	82,8	82,7	82,8
200	92,5	93,5	94	93,1	1600	83,9	83,9	83,6	83,6
250	91,7	93,2	93,4	92	2000	83,2	83,1	83	83,4
315	90,7	92,2	92,4	91,2	2500	82,9	82,8	82,9	83,1
400	88,6	89,4	89,6	89,4	3150	83,6	83,6	83,7	83,6
500	86,2	86,1	86,7	86,7	4000	82,7	82,7	82,7	82,6
630	85,4	85,1	85,1	85,4	5000	76,9	77	76,9	76,8

Algo similar ha ocurrido en la captación de la intensidad sonora en recepción. De nuevo en dos medidas, la diferencia entre barridos en ciertas bandas ha sido superior a 1 dB pero en ningún momento superior a 1,6 dB, exceptuando la banda de 5000 Hz en la primera medición que se hizo, que presenta una diferencia de 2,5 dB. En este caso se ha considerado que deben incluirse en el promediado debido a la gran cantidad de mediciones correctas que se tienen con un total de 10 incluyendo las que fallan en ese criterio. La Tabla 9 muestra las bandas en las que ha sucedido esto y la Tabla 10 contiene los resultados del promediado de las medidas de intensidad sonora.

Tabla 9. Niveles de intensidad sonora medidos en la sala receptora. Las bandas donde la diferencia de nivel es superior a 1 dB están marcadas en rojo.

F [Hz]	Medida 1 [dB]		Medida 3 [dB]		F [Hz]	Medida 1 [dB]		Medida 3 [dB]	
	Barrido 1	Barrido 2	Barrido 1	Barrido 2		Barrido 1	Barrido 2	Barrido 1	Barrido 2
100	56,1	56,9	57,9	56,6	800	37,4	37,8	37,6	37,6
125	57,3	57,8	57,3	57,9	1000	34,3	34,5	34,6	34,5
160	62,1	61,8	61,7	62	1250	33,5	35	33,9	34,6
200	64,2	63,5	63,7	63,7	1600	32,5	33,8	33	33,8
250	61,6	60,9	61,2	61,2	2000	33,3	34,3	33,9	34,1
315	57,4	57,3	57,3	57,5	2500	35,6	36,6	36,4	36,2
400	51,4	52,1	51,8	52,2	3150	35,7	37,2	36,7	36,9
500	47	47,9	47,3	47,9	4000	32,1	33,7	33,4	33,6
630	42,6	43,7	43,1	43,8	5000	21,9	24,4	24,3	24,4

Tabla 10. Promedio del nivel de intensidad sonora en el recinto receptor.

F [Hz]	L _{in} [dB]	F [Hz]	L _{in} [dB]
100	56,9	800	37,6
125	57,8	1000	34,5
160	62,1	1250	34,3
200	63,9	1600	33,4
250	61,3	2000	33,9
315	57,4	2500	36,4
400	52	3150	36,8
500	47,7	4000	33,4
630	43,5	5000	24,1

En la Figura 28 se representa el nivel de presión sonora promedio en el recinto emisor y el nivel de intensidad sonora en el recinto receptor. Teniendo ambos parámetros calculados, falta interpretar lo que debe contener el logaritmo de la fórmula (10). En el logaritmo se deben introducir la superficie de medida y la superficie que se ha cubierto con la sonda para medir. En este ensayo ambas superficies coinciden. La incertidumbre de medida se ha tomado directamente de la norma UNE-EN ISO 15186 [2]. En el Anexo A de la norma, viene indicada la desviación estándar obtenida de 30 medidas realizadas en tres laboratorios Escandinavos en exactamente las mismas condiciones de medida. En la Tabla 11 se expresa el índice de reducción sonora intensimétrico en cada banda. La Figura 29 es la representación gráfica de R_1 junto con la incertidumbre.

El estudio del aislamiento con la sonda PU presenta similitudes con el método de presión, ya que la ventana produce un aislamiento mayor en frecuencias medias-altas y menor aislamiento en frecuencias bajas. Como se comentó en apartados anteriores, el software VELO 5 de Microflown ofrece la opción de visualizar cómo se comportan diferentes parámetros en el aislamiento de la ventana gracias a Scan & Paint. Los siguientes mapas de colores representan la presión acústica registrada por la sonda en distintas bandas de frecuencia. La Figura 30 muestra los mapas de color extraídos del software de distintas bandas de frecuencia.

Las zonas de color más cálido representan un nivel de presión acústica más elevado que los colores fríos. En dichas imágenes se observa cómo, a medida que aumenta el rango de frecuencias, disminuye el nivel de presión sonora captado por la sonda resultando en un mayor aislamiento, tal y como describe la Figura 29.

Todo lo anterior es el resultado de la extracción de los datos empleando el método “Grid” pero también se han extraídos los datos que facilita el software utilizando la opción de cálculo “Transmission Loss”. Con esta opción se han tratado las medidas como independientes, de forma que se puede hacer un cálculo de la incertidumbre como si fuesen ensayos diferentes. La Tabla 12 recoge los resultados de los análisis empleando el método no estandarizado basado en *Scan & Paint*.

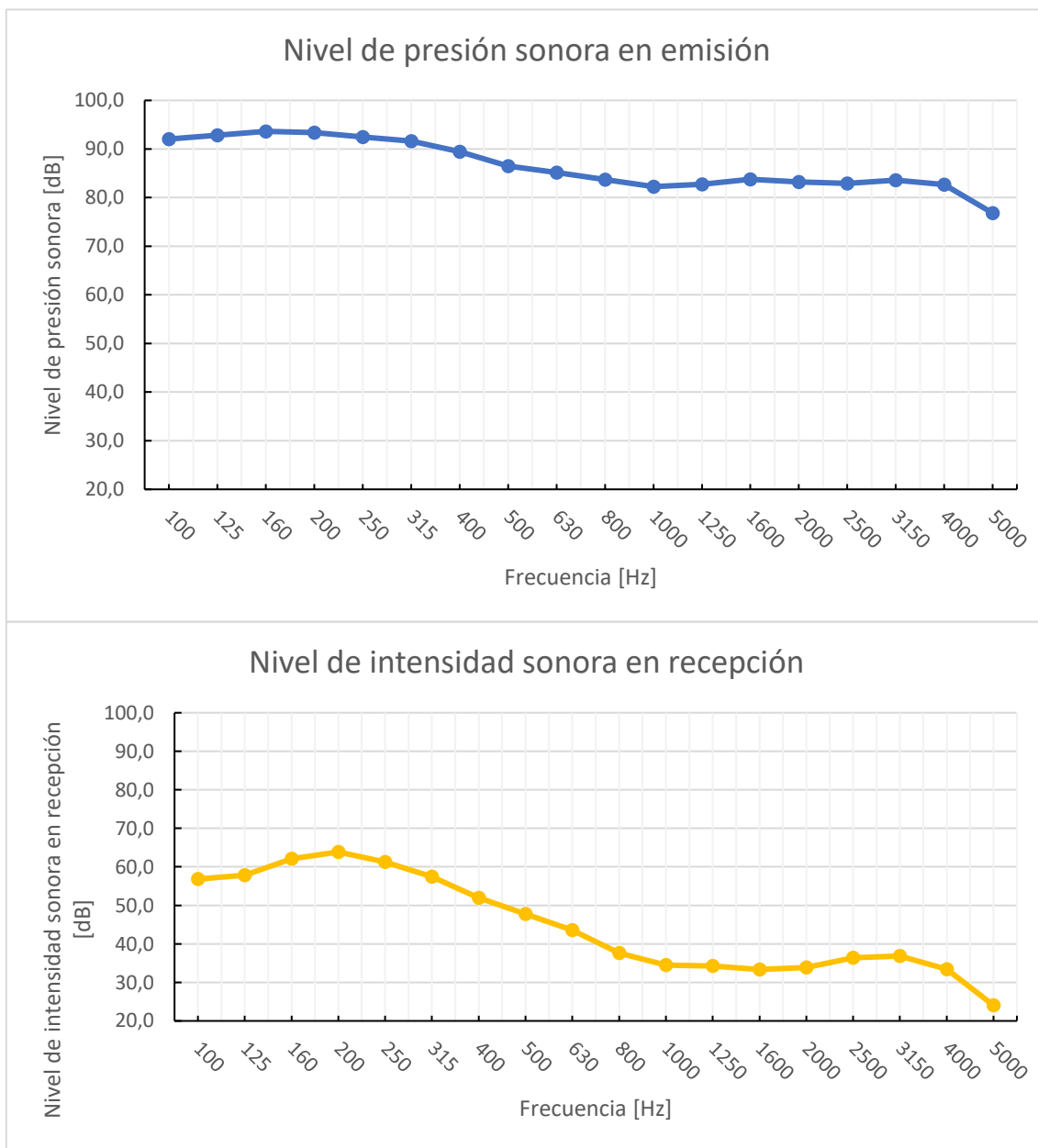


Figura 28. Arriba: Nivel de presión sonora promedio en el recinto emisor. Abajo: Nivel de intensidad sonora en el recinto receptor.

Tabla 11. Obtención del índice de reducción sonora intensimétrico.

F [Hz]	RI [dB]	Incertidumbre Tabla A.1 Norma 15186-1: 2000 [dB]
100	29,2	2,0
125	29,0	1,5
160	25,5	1,5
200	23,5	1,5
250	25,2	1,5
315	28,2	1,5
400	31,5	1,5
500	32,8	1,5
630	35,6	1,5
800	40,1	1,5
1000	41,8	1,5
1250	42,4	1,5
1600	44,4	1,5
2000	43,3	2,0
2500	40,6	2,0
3150	40,8	2,0
4000	43,3	2,0
5000	46,8	3,0

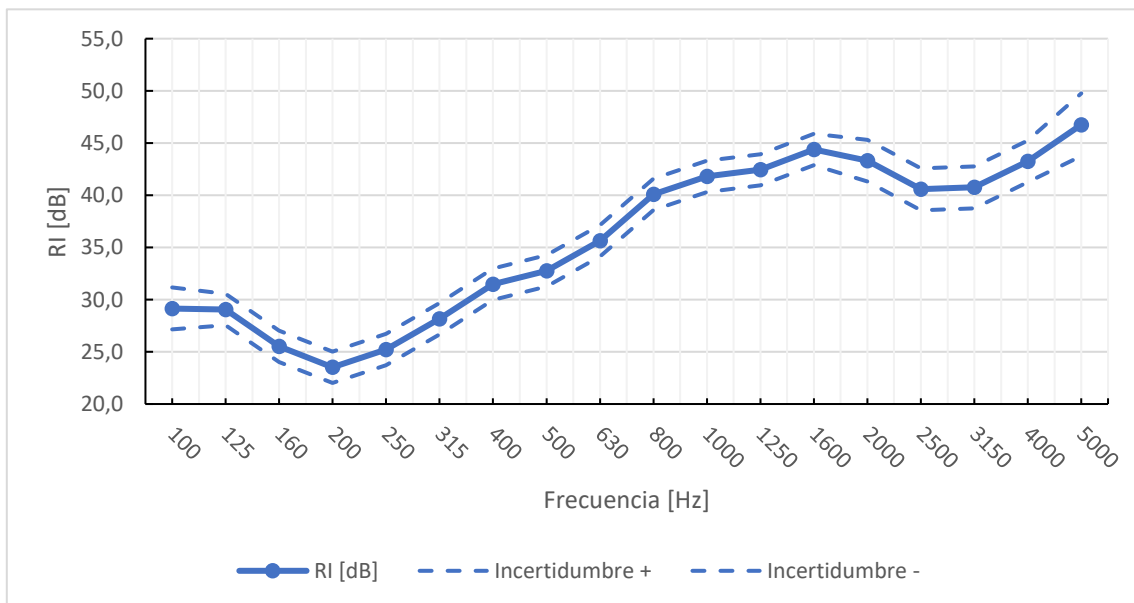


Figura 29. Índice de reducción sonora intensimétrico e incertidumbre.

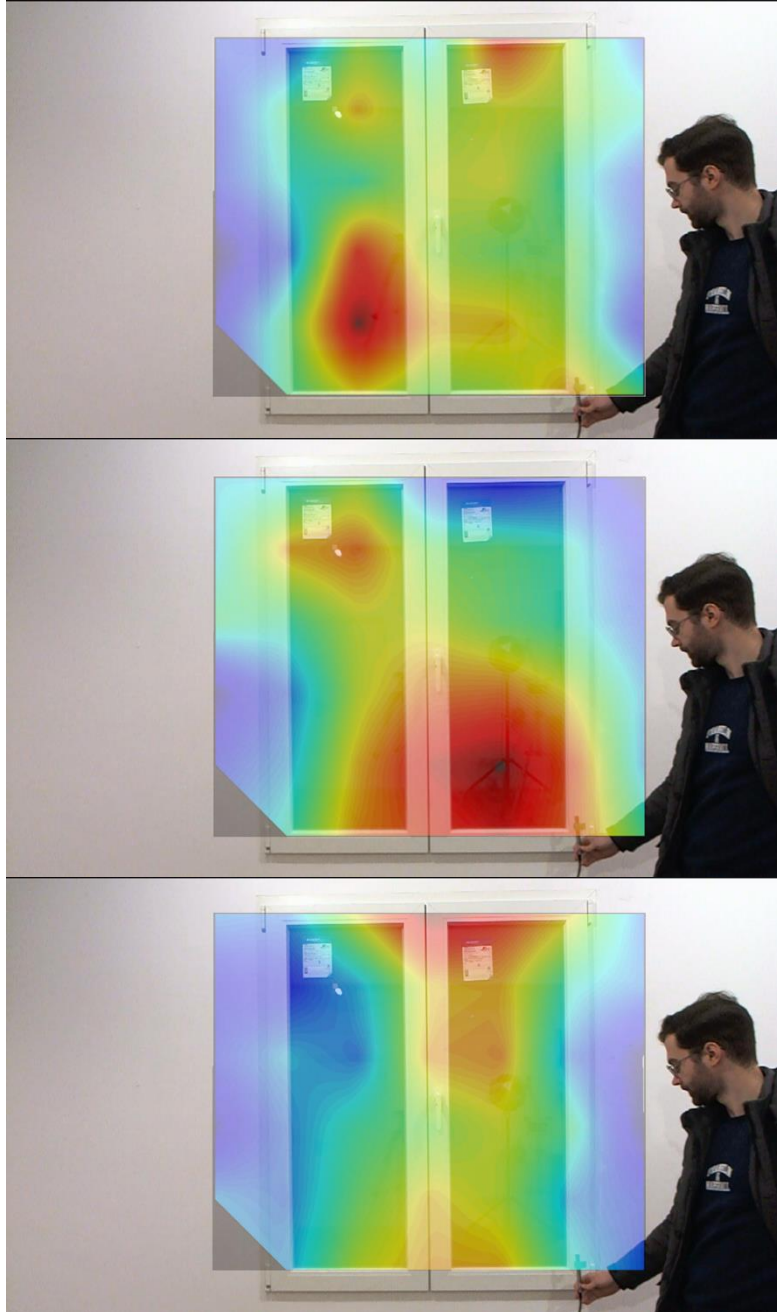


Figura 30. Presión acústica en las bandas de 50-200 Hz (Arriba), 200-1000 Hz (Centro), 1000-5000 Hz (Abajo).

Tabla 12. Resultados del método no estandarizado basado en Scan & Paint” obtenidos mediante el software VELO 5 de Microflown.

F [Hz]	Medida 1 TL[dB]	Medida 2 TL[dB]	Medida 3 TL [dB]	Medida 4 TL[dB]	Medida 5 TL [dB]	Promedio TL [dB]
100	31,1	28,5	28,6	28,7	28,6	29,1
125	31,1	28,3	28,4	28,6	28,4	29,0
160	27,2	24,7	24,9	25,4	25,0	25,4
200	24,7	22,5	22,4	23,2	22,9	23,1
250	26,4	24,3	23,7	24,7	24,4	24,7
315	29,6	27,7	27,0	27,8	27,5	27,9
400	33,7	31,4	31,1	31,4	31,1	31,7
500	35,4	32,1	32,3	32,7	32,7	33,0
630	38,1	34,6	35,2	35,1	35,1	35,6
800	41,9	38,9	39,4	39,3	39,3	39,8
1000	43,5	41,0	41,1	41,0	41,3	41,6
1250	45,0	41,9	42,0	42,2	42,0	42,6
1600	46,8	44,4	44,3	44,5	44,4	44,9
2000	45,8	43,3	43,3	43,3	43,2	43,8
2500	42,4	39,8	40,2	40,2	40,2	40,5
3150	42,8	40,1	40,4	40,3	40,3	40,8
4000	45,2	42,4	42,4	42,4	42,4	43,0
5000	48,3	45,4	45,1	45,3	45,3	45,9

La Medida 1 ha resultado con un nivel algo superior al resto de las medidas, pero la curva que realiza exactamente igual al resto de medidas, las cuales se encuentran superpuestas debido a la similitud de los resultados.

Es evidente que el resultado final del método “Transmission Loss” del software es claramente comparable al método de la norma de intensidad sonora. Por ende, los datos extraídos del software VELO 5 son fiables y se ajustan a la terminología de la norma. Por último, el cálculo de la incertidumbre se compara con los índices proporcionados en el Anexo A de la norma. Esos índices, como la propia norma define, representan la desviación estándar de las mediciones interlaboratorio. La incertidumbre se ha calculado dividiendo S [dB], siendo S la desviación estándar de las medidas, entre la raíz cuadrada del número de ensayos; en este caso cinco, tal y como indica la Norma UNE-EN ISO 12999 [17]. La Tabla 13 recoge el cálculo de la incertidumbre.

Tabla 13. Cálculo de incertidumbre de medidas del método "Transmission Loss".

F [Hz]	S [dB]	u _c
100	1,1	0,5
125	1,2	0,5
160	1,0	0,5
200	0,9	0,4
250	1,0	0,5
315	1,0	0,4
400	1,1	0,5
500	1,3	0,6
630	1,4	0,6
800	1,2	0,5
1000	1,1	0,5
1250	1,3	0,6
1600	1,1	0,5
2000	1,1	0,5
2500	1,1	0,5
3150	1,1	0,5
4000	1,3	0,6
5000	1,4	0,6

La Figura 31 compara la desviación estándar de la norma y la obtenida con "Transmission Loss".

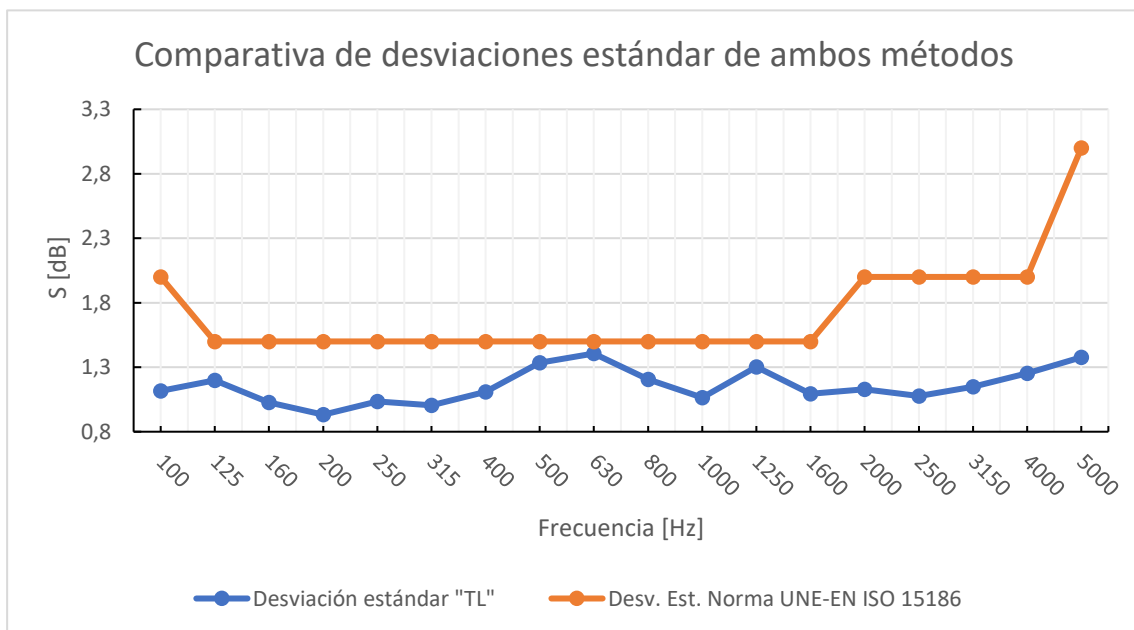


Figura 31. Comparativa de las desviaciones estándar de ambos métodos.

Las desviaciones estándar de ambos métodos son similares en prácticamente todas las bandas. A partir de 2000 Hz existe una mayor diferencia alcanzando la máxima de 1,4 puntos en 5000 Hz.

Barridos a 0,5m y 1m de distancia del elemento de ensayo en el recinto emisor

Como se dijo en el apartado de medidas, también se realizaron dos pares de barridos adicionales en el recinto emisor; un par a una distancia de 0,5 m y otro par a 1 m. La Tabla 14 muestra el promedio aritmético de los resultados de ambas mediciones.

Tabla 14. Cálculo del nivel de presión sonora promedio de ambas distancias.

F [Hz]	Medida 0,5 m Lp _{0.5m} [dB]	Medida 1 m Lp _{1m} [dB]	Lp promedio [dB]
100	89,4	88,2	88,8
125	89,9	88,6	89,2
160	89,2	88,4	88,8
200	89,4	90,1	89,8
250	90,1	90,9	90,5
315	90,4	90,5	90,5
400	89,8	89	89,4
500	87,3	87,2	87,3
630	85,5	85,9	85,7

F [Hz]	Medida 0,5 m Lp _{0.5m} [dB]	Medida 1 m Lp _{1m} [dB]	Lp promedio [dB]
800	83,8	84,1	83,9
1000	82,4	82,5	82,4
1250	83,3	83,2	83,3
1600	84	84	84
2000	83,4	83,5	83,4
2500	83,2	83,1	83,1
3150	83,8	83,9	83,9
4000	82,8	83	82,9
5000	76,9	77	77

La Tabla 15 muestra el cálculo de índice de reducción sonora intensimétrico utilizando como presión en emisión el promedio de ambas distancias.

Tabla 15. Cálculo de RI según el método no estandarizado a mayor distancia en el recinto emisor.

F [Hz]	Lp ₁ [dB]	L _{in} [dB]	RI [dB]	incertidumbre Tabla A.1 Norma 15186-1: 2000
100	88,8	56,9	26	2,0
125	89,2	57,8	25,4	1,5
160	88,8	62,1	20,7	1,5
200	89,8	63,9	19,9	1,5
250	90,5	61,3	23,2	1,5
315	90,5	57,4	27	1,5
400	89,4	52	31,4	1,5
500	87,3	47,7	33,5	1,5
630	85,7	43,5	36,1	1,5

F [Hz]	Lp ₁ [dB]	L _{in} [dB]	RI [dB]	incertidumbre Tabla A.1 Norma 15186-1: 2000
800	83,9	37,6	40,3	1,5
1000	82,4	34,5	42	1,5
1250	83,3	34,3	43	1,5
1600	84	33,4	44,6	1,5
2000	83,4	33,9	43,5	2,0
2500	83,1	36,4	40,8	2,0
3150	83,9	36,8	41	2,0
4000	82,9	33,4	43,5	2,0
5000	77	24,1	46,9	3,0

En la Figura 32 se compara los índices RI para estudiar cómo afecta la distancia de la sonda al elemento de ensayo al cálculo de aislamiento acústico.

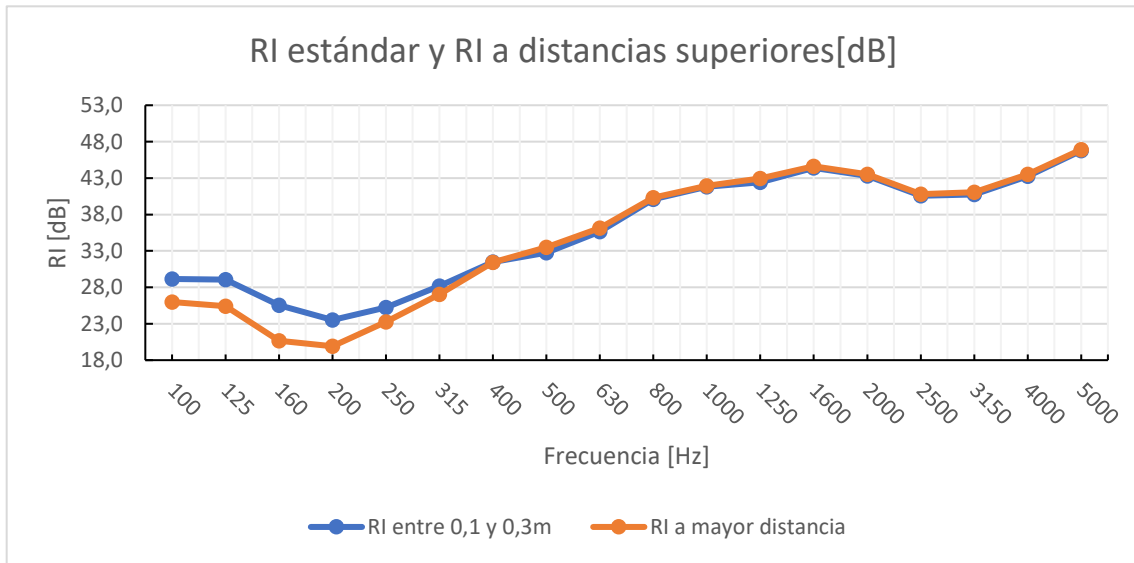


Figura 32. Comparativa de los resultados de RI a diferentes distancias.

Como se puede observar, la principal variación que existe entre las dos curvas sucede en bajas frecuencias. Esto es debido a que la ventana en el recinto se encontraba introducida en la pared. Por tanto, para realizar la medida a 0,2 m hubo que introducir la sonda en el hueco. En este tipo de espacios las frecuencias bajas tienen una mayor excitación debido a la acumulación de energía en las esquinas y por efecto del campo próximo; como consecuencia de acercar la sonda a la pared lateral se han captado unos niveles de presión superiores a los que se han captado a distancias mayores, ya fuera del hueco. La imagen de la Figura 33 muestra el hueco de la ventana.



Figura 33. Hueco en el que está montada la ventana en el recinto emisor.

Presión en recinto emisor medido con micrófono en continuo movimiento

En esta sección se ejecuta el mismo análisis con la sonda con la única diferencia que los niveles de presión sonora en emisión han sido captados por un micrófono en continuo movimiento aplicando la condición de repetibilidad. La Tabla 16 muestra el cálculo del índice RI de este ensayo.

Tabla 16. Cálculo de RI del ensayo de Microflown recogiendo la presión en el recinto emisor con un micrófono en continuo movimiento.

F [Hz]	Lp ₁ [dB]	L _{in} [dB]	R _i [dB]	incertidumbre Tabla A.1 Norma 15186- 1: 2000	F [Hz]	Lp ₁ [dB]	L _{in} [dB]	R _i [dB]	incertidumbre Tabla A.1 Norma 15186- 1: 2000
100	95,7	56,4	33,3	2,0	800	89	38	45	1,5
125	95,6	57,5	32	1,5	1000	87,7	35,1	46,5	1,5
160	95,2	61,1	28,1	1,5	1250	88,7	34,3	48,3	1,5
200	94,3	62,6	25,7	1,5	1600	89,5	33,2	50,3	1,5
250	94,9	60,2	28,7	1,5	2000	88,6	34	48,7	2,0
315	95,4	56,8	32,6	1,5	2500	88,1	36,4	45,7	2,0
400	94,1	51,2	36,9	1,5	3150	88,7	36,4	46,3	2,0
500	92,2	47,4	38,8	1,5	4000	87,9	32,5	49,4	2,0
630	90,4	43,6	40,8	1,5	5000	82,4	22,8	53,6	3,0

Reflejando los resultados sobre la gráfica de la Figura 34 y comparándolos con los obtenidos de medir la presión con la propia sonda.

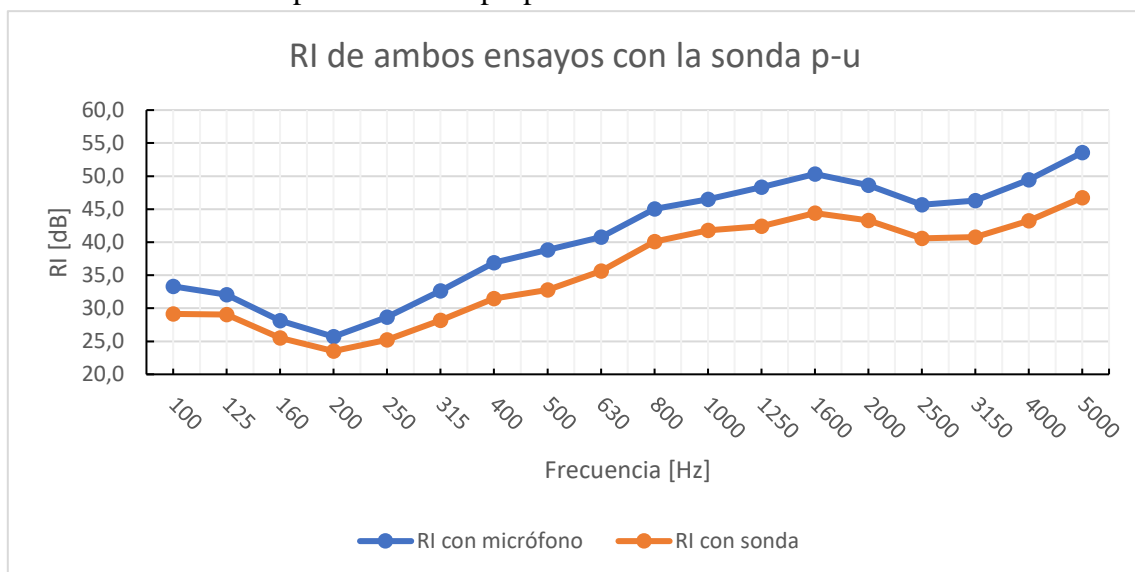


Figura 34. Comparativa entre los índices RI obteniendo la presión con micrófono y obteniéndola con la sonda p-u.

Como se puede observar, la curva del índice de reducción sonora intensimétrico resultado de medir la presión con un micrófono en continuo movimiento resulta con un nivel ligeramente superior. No obstante, la tendencia de la curva es muy parecida en ambos casos. Esta diferencia de niveles cobra sentido cuando este ensayo se compara con el ensayo de la sonda p-p y el ensayo del método de presión.

5.3. Cálculo de RI con la sonda p-p de Brüel & Kjaer

Con el objetivo de calcular el índice de reducción sonora intensimétrico con la sonda p-p de B&K hay que calcular el R_I de cada separador de forma independiente, ya que cada uno reacciona mejor a un rango de frecuencias diferente. El objetivo de este ensayo es establecer los resultados que aporte la sonda p-p como referencia para el ensayo con la sonda de Microflown.

Como en el ensayo con la sonda p-u de Microflown, se necesita promediar aritméticamente el nivel de presión acústica en el recinto emisión y el nivel de intensidad sonora en el recinto receptor, resultando los valores de R_I que se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Cálculo de RI con la sonda PP de B&K con el separador de 12 mm.

F [Hz]	L_{p1} [dB]	L_{in} [dB]	R_I [dB]	Incertidumbre Tabla A.1 Norma 15186- 1: 2000 [dB]
100	90,5	52,4	32,1	2,0
125	92,2	48,8	37,4	1,5
160	90,8	50,4	34,4	1,5
200	90,4	54,8	29,6	1,5
250	91,1	59,0	26,2	1,5
315	89,6	50,9	32,8	1,5
400	89,9	44,2	39,7	1,5
500	88,6	43,3	39,3	1,5
630	86,6	38,5	42,1	1,5
800	85,6	31,8	47,8	1,5
1000	84,1	30,7	47,4	1,5
1250	84,9	30,4	48,5	1,5
1600	85,4	28,5	50,9	1,5
2000	84,8	31,4	47,3	2,0
2500	84,2	32,7	45,5	2,0
3150	84,8	33,5	45,4	2,0
4000	84,0	30,9	47,1	2,0
5000	78,4	26,1	46,3	3,0

La incertidumbre es la misma que en el ensayo de la sonda de Microflown, tal y como indica la norma. Las Tablas 18 y 19 muestran el cálculo de R_I con los separadores de 6 mm y 50 mm.

Tabla 18. Cálculo de R_I con la sonda PP de B&K con el separador de 6 mm.

F [Hz]	L_{p1} [dB]	L_{in} [dB]	R_I [dB]	Incertidumbre Tabla A.1 Norma 15186-1: 2000 [dB]	F [Hz]	L_{p1} [dB]	L_{in} [dB]	R_I [dB]	Incertidumbre Tabla A.1 Norma 15186-1: 2000 [dB]
100	90,1	51,4	32,7	2	800	85,2	39,8	39,4	1,5
125	90,5	50,1	34,4	1,5	1000	84	35,7	42,2	1,5
160	89,6	51,9	31,7	1,5	1250	85	34,5	44,5	1,5
200	89,8	54	29,8	1,5	1600	85,5	33,8	45,7	1,5
250	91	58,4	26,7	1,5	2000	84,8	32,8	45,9	2
315	90,4	50,2	34,3	1,5	2500	84,1	32,5	45,6	2
400	90	46,9	37,1	1,5	3150	84,8	32,2	46,5	2
500	88	43,9	38,1	1,5	4000	84	30,8	47,2	2
630	86,2	42,7	37,6	1,5	5000	78,6	26,4	46,2	3

Tabla 19. Cálculo de R_I con la sonda PP de B&K con el separador de 50 mm.

F [Hz]	L_{p1} [dB]	L_{in} [dB]	R_I [dB]	Incertidumbre Tabla A.1 Norma 15186-1: 2000 [dB]	F [Hz]	L_{p1} [dB]	L_{in} [dB]	R_I [dB]	Incertidumbre Tabla A.1 Norma 15186-1: 2000 [dB]
100	91,2	58,6	26,6	2	800	85,4	38,9	40,4	1,5
125	90,4	55,1	29,2	1,5	1000	84	36,3	41,7	1,5
160	91,3	56,2	29,1	1,5	1250	85,4	35,6	43,7	1,5
200	90,7	61,3	23,5	1,5	1600	85,9	35,2	44,7	1,5
250	90,4	65,5	19	1,5	2000	84,9	36	42,9	2
315	91,3	56,7	28,5	1,5	2500	84,6	36,6	41,9	2
400	90,2	50,6	33,5	1,5	3150	85,2	36,6	42,7	2
500	88,5	50	32,6	1,5	4000	84,7	32,7	46	2
630	86,8	44,7	36,1	1,5	5000	79,2	25,6	47,6	3

La Figura 35 muestra los índices de reducción sonora intensimétrico obtenido con los distintos separadores.

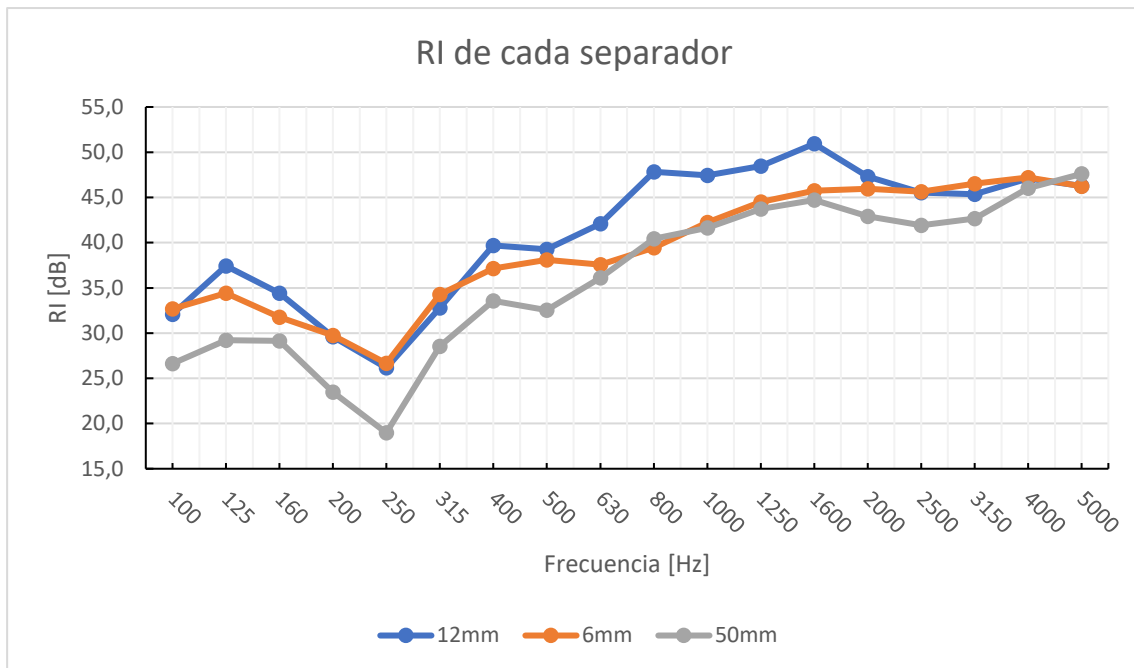


Figura 35. RI obtenido con los distintos separadores de la sonda PP de Brüel & Kjaer.

Habiendo medido con los tres separadores en las mismas condiciones, se observan diferencias claras en el nivel por parte del separador de 12 mm en frecuencias medias y altas. Pese a que parece un error de medición, se realizaron más medidas a modo de comprobación, repasando bien todos los pasos del ensayo, y se arrojaron resultados prácticamente iguales. Por tanto, los datos de la gráfica se consideran válidos en el ensayo.

5.4. Comparativa de ensayos

En este apartado se comparan los tres ensayos entre sí, de forma que puede verse la relación de niveles que presenta cada uno de ellos. Esta relación representa la calidad de los resultados finales de medidas de aislamiento realizadas bajo dos normas diferentes y tres ensayos con equipo totalmente distinto, siendo uno de ellos la sonda PU de Microflown no contemplada como instrumento de medida estandarizado en ninguna norma europea.

En primer lugar, se comparan los resultados de ambos ensayos estandarizados; el método de presión acústica de la Norma UNE-EN ISO 10140 y el método de cálculo de aislamiento acústico empleando intensidad sonora con la sonda PP de B&K con la Norma UNE-EN ISO 15186 [8]. La Figura 36 representa las curvas de los tres espaciadores y la curva del índice de reducción acústica R del método de presión.

Como se puede observar, ambos métodos responden bien en el rango de frecuencias medias-altas y se disgregan a partir de 1600 Hz y 630 Hz con los separadores de 6 y 50 mm. La curva obtenida con el separador de 12 mm está por encima de las otras dos para frecuencias medias y altas, aunque los niveles son similares en bajas frecuencias. Atendiendo a lo comentado en el apartado 2.4, descartando la medida realizada con el separador de 12 mm, y utilizando los valores de los otros dos separadores, se consigue una curva muy similar a la del método de presión (Figura 37).

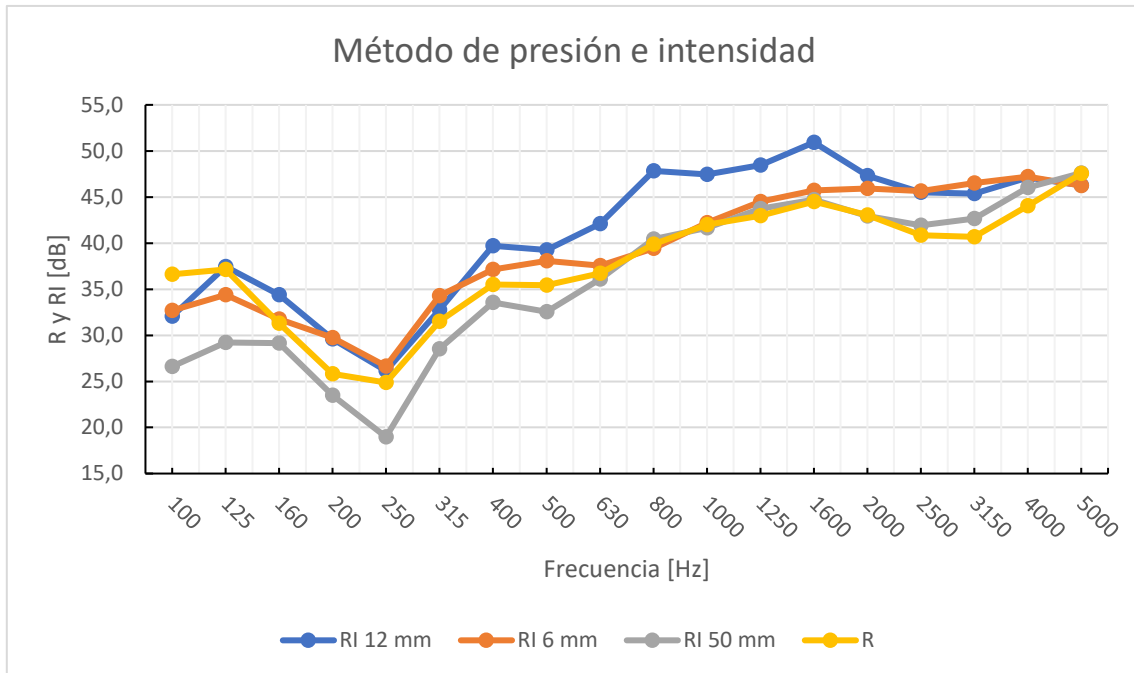


Figura 37. Representación gráfica del resultado del ensayo del método de presión sonora (R) frente al método de intensidad empleando la sonda PP de B&K (RI).

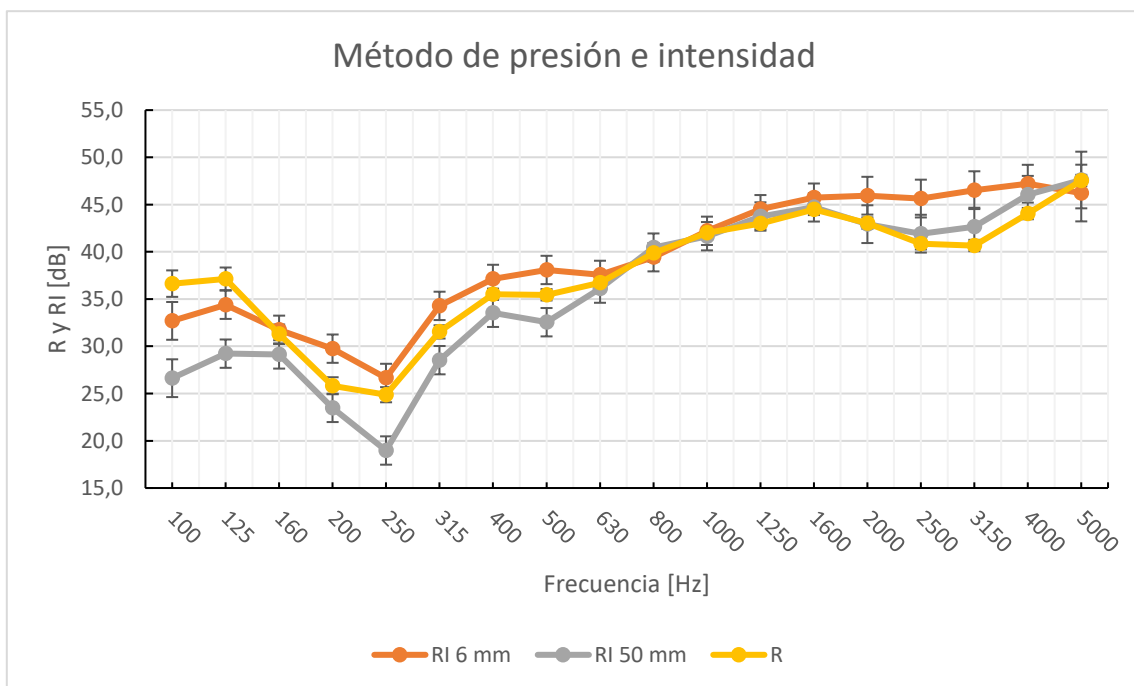


Figura 36. Curvas de nivel de R y RI con descartando el separador de 12 mm, incluyendo las barras de error asociadas a la incertidumbre.

Aunque la tendencia de ambas curvas sea la esperada, han de tenerse varias cosas en cuenta. La curva del separador de 50 mm se ajusta casi a la perfección con la curva obtenida mediante el método de presión sonora a partir de 630 Hz. No obstante, el separador de 50 Hz responde mejor en bajas frecuencias y solo aporta resultados fiables hasta 1250 Hz. Por tanto, lo que sucede a partir de esa frecuencia no se puede tomar como resultado válido. Además, en bajas frecuencias, donde los resultados sí son veraces, ninguno se ajusta a la posible variación de nivel que pudiera darse dentro del rango de la incertidumbre. Lo mismo sucede con el separador de 6 mm. Presenta una mejor respuesta en bajas frecuencias pese a que no es el rango de frecuencias para el que está destinado su uso. Siendo menos rigurosos, la frecuencia hasta la que se puede extender el rango fiable de datos es de 250 Hz pero serán cada vez menos precisos a medida que se acerca a esa frecuencia. Por tanto, se deben analizar las frecuencias altas dado que es el rango para el que está dedicado a este separador. En este aspecto, a partir de 1600 Hz, las curvas R y R_I se separan para volver a juntarse en la banda de 5000 Hz. A diferencia de lo que ocurre con el separador de 50 mm en bajas frecuencias, la curva de R_I del separador de 6 mm sí se encuentra dentro de la variación de la incertidumbre. Por ende, en este ensayo la sonda p-p de B&K ha reaccionado mejor en medias frecuencias a la hora de compararlo con el método de presión acústica. En este caso, viendo que todas las curvas tienen variaciones destacables, lo más eficiente a la hora de reducir errores sistemáticos de los resultados es promediar todos los separadores y utilizar esa curva como elemento de comparación con la sonda p-u. La Figura 38 muestra el promedio de las curvas de los tres separadores y la curva del método de presión.

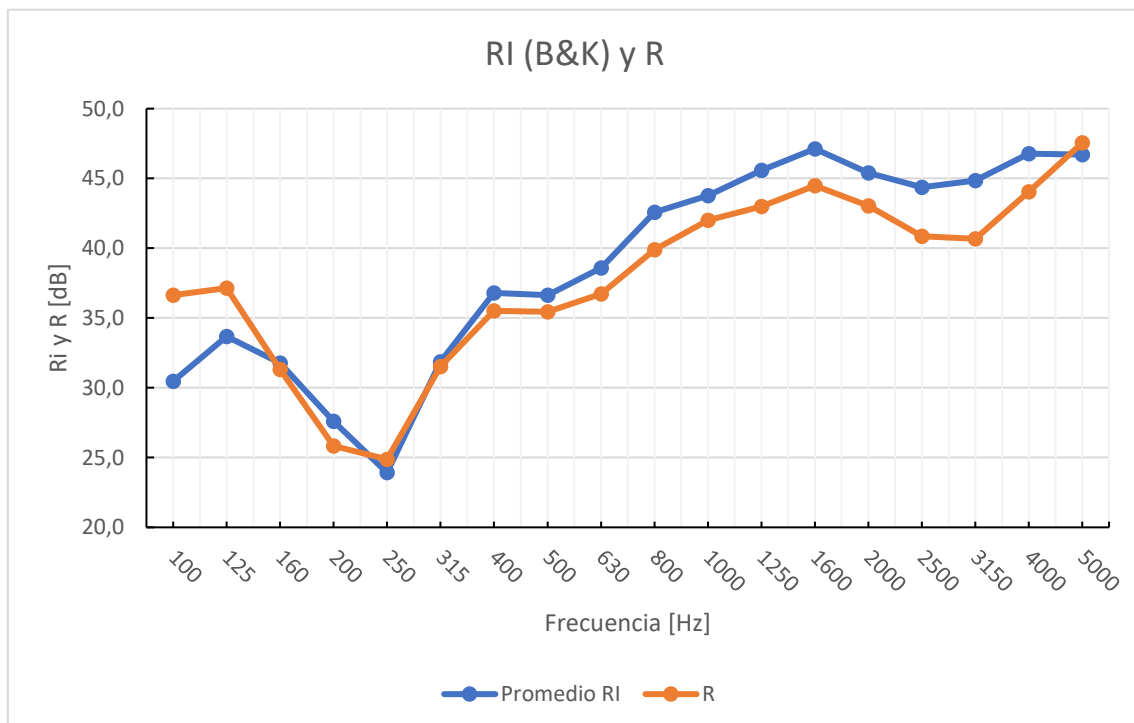


Figura 38. RI de la sonda p-p y R del método de presión.

En segundo lugar, se comparan el método de intensidad sonora de Microflown con el método de presión. Habiendo seguido la misma norma y medido en las mismas condiciones, la sonda de Microflown concede unos resultados muy positivos (Figura 39). La tendencia de la curva es similar y en medias-altas frecuencias el nivel es prácticamente igual que el índice R del método de presión. En frecuencias medias y bajas se perciben unas variaciones muy grandes, especialmente en bajas, las cuales no presentan resultados convincentes pese a que en la banda de 250 Hz coinciden en prácticamente el mismo valor. Al igual que sucedía con la sonda p-p de B&K, las frecuencias bajas no han dado buenos resultados en ninguno de los ensayos, esto puede deberse a diversos motivos:

- La fuente utilizada no es capaz de emitir suficiente potencia sonora a las frecuencias más bajas.
- La cámara reverberante, debido a la arquitectura o disposición de los equipos, desvirtúa las frecuencias más bajas, consecuencia de los modos propios del recinto.
- Las sondas tienen dificultades a la hora de registrar los datos en esos rangos de frecuencia.

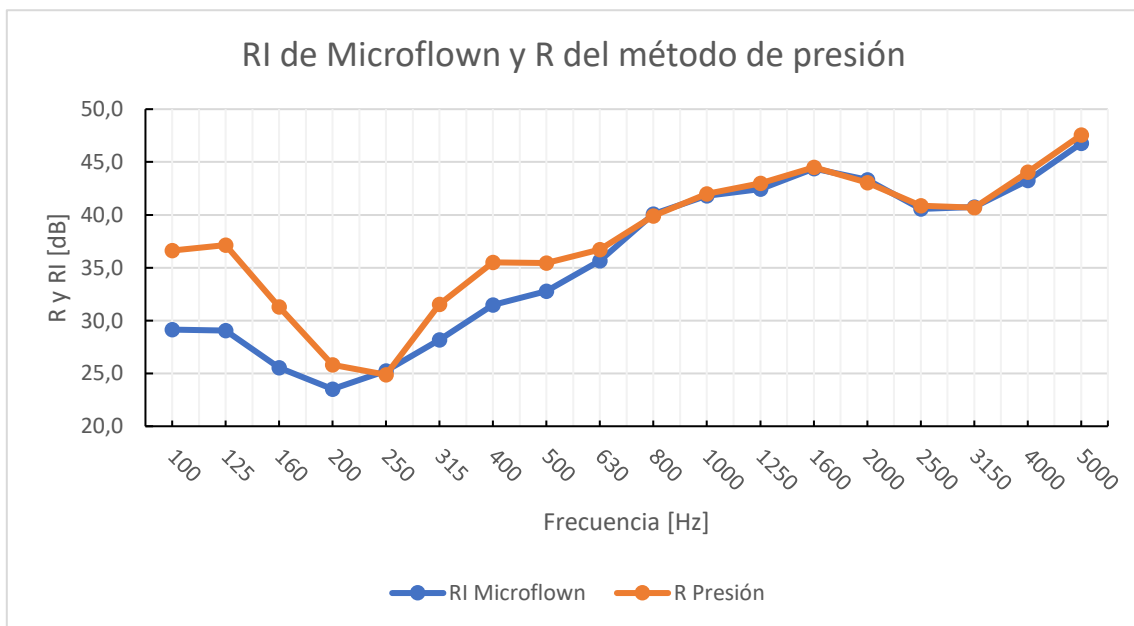


Figura 39. Representación gráfica del resultado del ensayo del método de presión sonora (R) frente al método de intensidad empleando la sonda PU de Microflown (RI).

Respecto al índice R_I calculado midiendo los niveles de presión sonora con un micrófono en continuo movimiento, se compara en la Figura 40 con el índice R_I promedio obtenido con la sonda de Brüel & Kjaer. A diferencia de lo que sucede con la curva de la sonda p-u habiendo medido la presión con la propia sonda, la nueva curva se ajusta más a la de la sonda p-p. En este punto del proyecto se contempla un claro paralelismo entre ensayos:

- La curva de la sonda p-u midiendo intensidad y presión con la propia sonda se ajusta mejor al ensayo del método de presión.

- La curva de la sonda p-u midiendo la presión con un micrófono en continuo movimiento y la intensidad con la sonda p-u, se ajusta mejor a la curva resultante del ensayo con la sonda p-p de Brüel & Kjaer.

El ensayo de la sonda p-u de Microflown ha aportado resultados muy positivos siguiendo la Norma UNE-EN ISO 15186 [2] pese a no estar incluida en ella como instrumento de medición estándar. Para terminar de comprobar si las variaciones que se han observado en medias y bajas frecuencias son el resultado real de lo analizado con la sonda, o son fruto de alguna imperfección de la cámara reverberante, habría de explorar más ensayos en distintas ubicaciones, tanto cámaras especialmente preparadas para esta clase de ensayos como mediciones *in situ*.

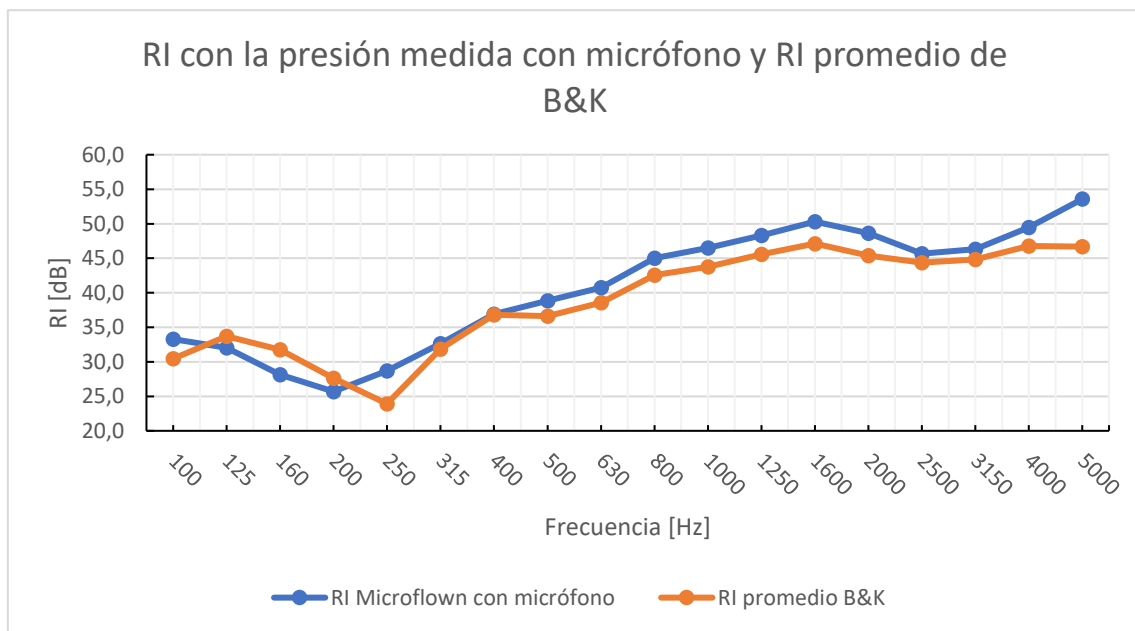


Figura 40. Comparativa del índice RI de la sonda p-u y el índice RI de p-p

Si se compara con la sonda p-p de B&K, las frecuencias bajas responden más adecuadamente comparándolas con la sonda p-u de Microflown. Algunas de las bandas en el rango bajo de frecuencias coinciden con los valores del separador destinado a ser utilizado en ese rango, que es el de 50 mm. No obstante, se mantiene el problema que presentaba la sonda p-p con el método de presión en altas frecuencias, ya que la curva a partir de la banda de 630 Hz de la sonda de Microflown, es prácticamente igual que la curva del método de presión. La Figura 41 representa los resultados de todos los ensayos en una misma gráfica.

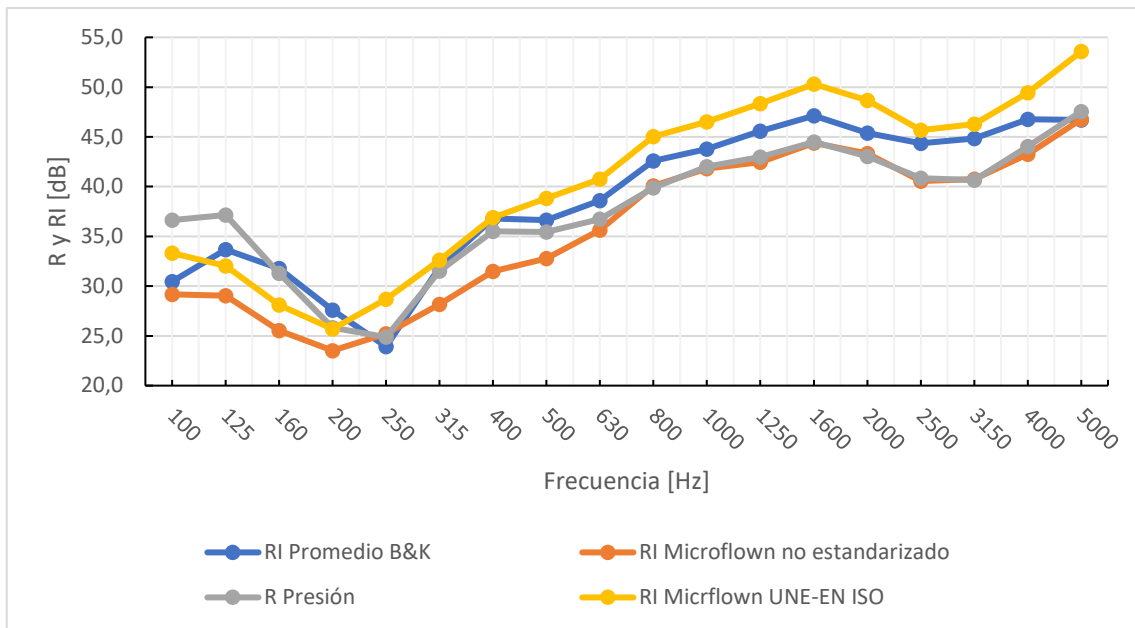


Figura 41. Resultados de todos los métodos de cálculo de aislamiento.

6. Propuesta de estandarización del método de medida con la sonda p-u de Microflowm basado en “Scan and Paint”

A continuación, se propone una serie de indicaciones para medir con la sonda p-u para conseguir datos fiables en base a lo experimentado en el transcurso del proyecto.

1. Situar la cámara de forma que el centro de imagen coincida con el centro geométrico del elemento de ensayo.
2. Ajustar el plano para que sea totalmente paralelo a la superficie sobre la que se va a realizar el escaneo.
3. Ajustar el *zoom* de la cámara para aprovechar el máximo número de píxeles posibles sobre la superficie que se va a escanear. No cortar el elemento de ensayo por los límites del plano.
4. Sostener la sonda de forma que su eje longitudinal sea perpendicular al suelo
5. Ajustar la cinta fosforescente en el límite en el que comienzan los hilos calientes para tener un error mínimo de desfase de posición de medida con “Scan & Paint”.
6. Situarse de lado a la pared, alargando el brazo para evitar posibles obstaculizaciones entre la cinta fosforescente y la cámara.
7. Asegurarse de que la sonda siempre ofrece la misma cara a la superficie que se vaya a medir, de forma que el sonido incida en los hilos calientes siempre con el mismo ángulo de incidencia.
8. La mirada debe ser oblicua con el plano paralelo a la superficie de ensayo, de forma que se pueda percibir bien el recorrido del barrido y la distancia de la sonda a dicha superficie.

Por supuesto, estas indicaciones tienen innumerables posibilidades y opciones en el momento de ejecución. Lo importante es prestar atención a los requerimientos a de la norma de intensidad UNE- EN ISO 15186 [2].

- Velocidad constante de barrido.
- Distancia del plano de medida paralelo a la superficie de ensayo.
- Ángulo de incidencia constante y perpendicular a la superficie de medida.

7. Conclusiones

En este proyecto se han comparado diferentes métodos de medida de aislamiento acústico. Como se desconocía como se comportaría la sonda p-u bajo las directrices de una norma, el primer paso fue comprobar que una sonda que basa su funcionamiento en intensidad sonora ofrece resultados comparables a los que ofrecería otro método u otra sonda de intensidad siguiendo la Norma UNE-EN ISO 15186 destinada a determinar el aislamiento acústico en edificios empleando intensidad sonora. Dado que, al seguir dicha norma, la sonda ha dado excelentes resultados, se proponen implementaciones al método de medición que podrían corregir algunos problemas derivados del desempeño humano al medir “a mano alzada”.

Se ha comprobado que la distancia de medida cuando la ventana se encuentra encajada en un hueco especialmente profundo afecta en frecuencias bajas y hace impreciso el cálculo de aislamiento. En este proyecto se han encontrado diferencias notables del comportamiento de los separadores de la sonda p-p a la hora de arrojar resultados similares al resto de métodos. La sonda p-u ha logrado realizar medidas precisas y ajustadas a los otros métodos, incluyendo el estudio del aumento de distancia para evitar el hueco de la ventana. El método no estandarizado de la sonda p-u de Microflown ha dado unos resultados muy relacionados a los del método de presión, mientras que los resultados del método estandarizado lo han hecho con los de la sonda p-p de B&K.

Concluyendo el estudio, la sonda de Microflown es un instrumento ergonómico y práctico para medir aislamiento acústico. Los resultados finales han confirmado que el método “Scan & Paint” utilizando la sonda p-u es un potencial instrumento de medida de aislamiento *in situ* y un campo de investigación sin precedentes para el futuro de la acústica.

Se realiza una propuesta de estandarización del método de medida con la sonda p-u basado en Scan and Paint. Además, se proponen implementaciones adicionales que tienen como objetivo único mejorar la calidad y precisión de los resultados que se obtengan en los ensayos:

- Estabilizador con el mismo génesis de idea que el de una cámara; capaz de mantener la sonda siempre con el eje central del cilindro perpendicular y horizontal al suelo durante toda la medición, además de mantener el lateral de la sonda que recoge la intensidad positiva siempre enfocando al elemento de ensayo con el mismo ángulo de inclinación.
- Soporte o brazo que ofrezca la capacidad de mantener el plano paralelo al elemento de ensayo en todo momento.
- Motor implementado en el brazo que permita recorrer el barrido a velocidad constante. Con esto se consigue que la sonda haga el mismo recorrido y tenga la misma información para el posterior promediado en todos los puntos del plano paralelo al elemento de ensayo.
- Dispositivo emisor de luz o láser que permita al software VELO 5 hacer un seguimiento de la sonda más preciso.

8. Presupuesto de proyecto

A continuación, se describen los costes derivados de la realización de este proyecto. Se contempla:

- Tiempo dedicado al proyecto.
- Alquiler de equipamiento.
- Alquiler de cámara reverberante.
- Impresión del proyecto en papel.

La Tabla 20 muestra el presupuesto de este proyecto. El tiempo dedicado al proyecto se ha calculado en base al sueldo de un ingeniero recién graduado. Suponiendo un sueldo neto anual de 21000€, resulta un precio por hora de 10,94€. Los precios de alquiler de equipamiento han sido proporcionados por ArquilAV y los costes de impresión propuestos por la imprenta encargada de la impresión del proyecto.

Tabla 20. Presupuesto del proyecto.

	Tiempo [h]	Precio	Total
Tiempo dedicado al proyecto	300	10,94 €	3.282,00 €
Alquiler equipamiento	120	10,42 €	1.250,00 €
Alquiler cámara reverberante	120	16,67 €	2.000,00 €
Impresión proyecto en papel	-	80,00 €	80,00 €
Total			6.612,00 €

9. Responsabilidad Social y Ambiental

La responsabilidad social y ambiental es un compromiso fundamental, y una de las áreas en las que se enfoca el proyecto es la capacidad de realizar mediciones de aislamiento *in situ*.

Al realizar mediciones de aislamiento *in situ*, se minimizan los efectos negativos en el entorno. Esto implica llevar a cabo mediciones de manera eficiente y precisa, asegurándose de seguir las mejores prácticas y cumplir con todas las regulaciones ambientales vigentes. Además, se reduce al mínimo cualquier posible alteración o perturbación en el entorno natural durante el proceso de medición.

La medida de aislamiento *in situ*, que consiste en realizar análisis o experimentos directamente en el lugar donde se encuentran las muestras o los sujetos de estudio, contribuye significativamente al bienestar de las personas. Esta práctica evita la necesidad de transporte de muestras y equipos a laboratorios externos, lo que reduce los riesgos asociados a posibles contaminaciones y daños en el traslado. Al realizar los análisis en el mismo entorno, se minimiza el tiempo de espera y se obtienen resultados más rápidos, lo que facilita la toma de decisiones y la implementación de medidas correctivas o preventivas de manera oportuna. Además, el aislamiento *in situ* preserva la integridad del ambiente natural o de los sujetos involucrados, evitando alteraciones innecesarias y promoviendo un enfoque más sostenible en la investigación científica y la protección del medio ambiente.

En resumen, realizar mediciones de aislamiento *in situ* impulsa a actuar de manera responsable tanto desde una perspectiva ambiental como social.

10. Bibliografía

- [1] Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 4: Procedimientos y requisitos de medición (ISO 10140-4:2021).
- [2] Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción utilizando intensidad sonora. Parte 1: Medidas en laboratorio. (ISO 15186-1:2000)
- [3] Exploring the properties of acoustic particle velocity sensors for near-field noise source localization applications. [Online]. Available: https://www.microflown.com/assets/uploads/Publications/2014_forumacousticum_near_field_measurements.pdf
- [4] ¿Cuáles son los tipos de aislantes más utilizados? [Online]. Available: <https://www.europeanacustica.com/aislamiento-acustico/tipos-de-acusticos-mas-utilizados>
- [5] Scan and Paint: Theory and Practice of a Sound Field Visualization Method. [Online]. Available: https://www.microflown.com/assets/uploads/Publications/2013_ISRN_Scan_and_Paint_principles.pdf
- [6] Cástor Rodríguez-Fernández y Daniel Fernández-Comesaña. “In-situ estimation of sound transmission loss using a scanning sound intensity p-u probe”. En Simpósio de Acústica e Vibrações. 2017.
- [7] Daniel Fernández-Comesaña, Jelmer Wind y Andrea Grosso. “Performance of p-p and p-u intensity probes using Scan & Paint”. En 18th International Confress on Sound & Vibration. 2011.
- [8] La contaminación acústica, ¿cómo reducir el impacto de una amenaza invisible? [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-contaminacion-acustica-causas-efectos-soluciones>
- [9] ¿Qué es el aislamiento acústico?. [Online]. Available: <https://www.viacelere.com/blog/que-es-el-aislamiento-acustico/#:~:text=El%20aislamiento%20ac%C3%BAstico%20es%20la,%2C%20restaurantes%2C%20salas%20de%20conciertos%E2%80%A6>
- [10] Brüel & Kjaer: Cómo se mide la intensidad sonora. [Online]. Available: <https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/sound/measuring-sound-intensity>
- [11] Kit de sonda de intensidad Sonora. [Online]. Available: <https://www.bksv.com/es/transducers/acoustic/sound-intensity-probes/3599>
- [12] PU Regular. [Online]. Available: <https://www.microflown.com/products/standard-probes/pu-regular>
- [13] ArquiLAV. Instalaciones. [Online]. Available: <http://www.arquilav.aq.upm.es/?q=instalaciones>
- [14] Calibrador de intensidad de sonido modelo 4297 – Brüel & Kjaer [Online]. Available: <https://midebien.com/producto/calibrador-de-intensidad-4297-bruel-kjaer/>
- [15] MFPA-2. [Online]. Available: <https://www.microflown.com/products/pre-amplifiers-frontends/mfpa-2>
- [16] Product Catalog. Página 47. [Online]. Available: <https://www.acousticware.com/downloads/Catalogs/Microflown-Product-Catalog.pdf>
- [17] Acústica. Determinación y aplicación de las incertidumbres de medición en la acústica de edificios. Parte 1: Aislamiento acústico. ISO 12999-1:2020.

[18] ¿Qué es la contaminación acústica? [Online]. Available: <https://www.zaragoza.es/sede/portal/medioambiente/ruido/contaminacion-acustica/>