



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

EVALUACIÓN DE DIFERENTES PROCEDIMIENTOS
PARA LA MEDIDA DE LA POTENCIA ACÚSTICA DE UNA
FUENTE ACÚSTICA DE FACHADA.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e
Imagen

AUTOR/A: Mayor Boronat, Pau

Tutor/a: Rey Tormos, Romina María del

Cotutor/a: Alba Fernández, Jesús

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

“A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Sin su confianza y sacrificio, este logro no habría sido posible.

A mis profesores y mentores, por guiarme a lo largo de este camino académico y profesional. Sus conocimientos y consejos han sido fundamentales para mi desarrollo.

A mis amigos y compañeros, por su compañía, comprensión y por hacer de este viaje una experiencia inolvidable. Gracias por estar siempre ahí, en los buenos y malos momentos.

Y finalmente, a todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a la realización de este proyecto. Su ayuda y colaboración han sido invaluable”.

Resumen

Conocer los niveles de potencia acústica de una fuente es fundamental en cualquier actuación de ingeniería acústica: desde problemas de Seguridad e Higiene en el trabajo (Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo), actuación de protección frente carreteras o ferroviarias, e incluso actuaciones de acústica arquitectónica y/o aislamiento acústico. En concreto, la fuente de ruido que se utiliza para determinar el aislamiento acústico a ruido aéreo de fachada ha de generar una potencia acústica con unas condiciones dadas por la norma UNE-EN ISO 16283-3:2016 que son restrictivas.

Existen diferentes procedimientos normativos para evaluar la potencia acústica de una fuente. Estos métodos se pueden distinguir en función de su grado de precisión. Existen los llamados “métodos de laboratorio” (UNE EN ISO 3741:2011 y UNE EN ISO 3745:2012), donde las propias normativas describen que los ensayos deben de ser realizados, bien en cámara reverberante (UNE EN ISO 3741:2011) bien en cámara anecoica o semianecoica (UNE EN ISO 3745:2012), y “métodos de ingeniería” (UNE EN ISO 3744:2011 y otros).

En este trabajo se evalúan los niveles de presión sonora de la fuente acústica de fachada utilizada en la propia unidad docente del Departamento de Física Aplicada del Campus de Gandía para medidas de aislamiento a ruido aéreo de fachada, por diferentes procesos normativos, tanto de grado de precisión máxima: método cámara reverberante absorción sonora y método comparativo en cámara reverberante, como por el método de ingeniería: condiciones de campo lejano sobre superficie reflectante. Los resultados son analizados con su incertidumbre asociada, así como el cumplimiento de la norma UNE-EN ISO 16283-3:2016.

Palabras clave: potencia acústica, fuente de fachada, normativa, aislamiento acústico, incertidumbre.

Abstract

Knowing the acoustic power levels of a source is essential in any acoustic engineering action: from Safety and Hygiene problems at work (Royal Decree 486/1997, of April 14, which establishes the minimum safety and health in workplaces), protection actions against roads or railways, and even architectural acoustics and/or acoustic insulation actions. Specifically, the noise source used to determine the acoustic insulation of the façade against aerial noise must generate an acoustic power with conditions given by the UNE-EN ISO 16283-3:2016 standard that are restrictive.

There are different regulatory procedures to evaluate the acoustic power of a source. These methods can be distinguished based on their degree of precision. There are so-called “laboratory methods” (UNE EN ISO 3741:2011 and UNE EN ISO 3745:2012), where the regulations themselves describe that the tests must be carried out, either in a reverberant chamber (UNE EN ISO 3741:2011) or in anechoic or semi-anechoic chamber (UNE EN ISO 3745:2012), and “engineering methods” (UNE EN ISO 3744:2011 and others).

In this work, the sound pressure levels of the façade acoustic source used in the teaching unit of the Department of Applied Physics of the Gandía Campus are evaluated for airborne noise insulation measures on the façade, by different regulatory processes, both degree of Maximum precision: reverberant chamber sound absorption method and comparative method in reverberant chamber, as by the engineering method: far field conditions on reflective surface. The results are analyzed with their associated uncertainty, as well as compliance with the UNE-EN ISO 16283-3:2016 standard.

Keywords: acoustic power, façade source, regulations, acoustic insulation, uncertainty.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	5
1.2. OBJETIVOS	6
1.3. METODOLOGÍA	7
2. MARCO TEÓRICO, LAS NORMATIVAS ISO	7
3. MEDIDAS Y RESULTADOS OBTENIDOS	10
3.1. MÉTODO DIRECTO DE LABORATORIO EN CÁMARAS REVERBERANTES	10
3.2. MÉTODO DE COMPARACIÓN DE LABORATORIO EN CÁMARAS REVERBERANTES	23
3.3. CÁMARA ANECOICA	26
3.4. CAMPO ESENCIALMENTE LIBRE SOBRE UN PLANO REFLECTANTE	40
4. COMPARATIVA	46
5. CONCLUSIONES	48
6. BIBLIOGRAFÍA	51
7. ANEXOS	53

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

En la asignatura de Ingeniería Acústica ambiental, del semestre 1 del Doble Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicaciones, Sonido e Imagen y Comunicación Audiovisual, en la parte dedicada a prácticas de laboratorio, se estudian y se llevan a cabo por los propios estudiantes dos métodos distintos para conocer la potencia acústica de una fuente.

La potencia sonora es la energía sonora total emitida por una fuente en todas direcciones en una unidad de tiempo. Esta es una medición objetiva que no depende de las condiciones ambientales ni de la distancia de la fuente. Conocer la potencia sonora de una fuente es importante porque permite evaluar y comparar el impacto acústico de diferentes tipos de fuentes de ruido, en la vida cotidiana por ejemplo, de diferentes electrodomésticos, lo que ayuda a diseñar espacios que controlen el ruido y cumplan con las normas de ruido para proteger la salud y el bienestar humano.

Los dos métodos utilizados para la obtención de la potencia acústica de una fuente de ruido durante las sesiones de prácticas, al menos en el curso 2023-2024, fueron:

- Método directo en cámara reverberante, con la Norma ISO 3741:2011
- Método de superficie envolvente, con la Norma ISO 3746:2011

Y la fuente de ruido utilizada, fue un secamanos comercial, de los que se instalan en sanitarios públicos, y que, en algún momento fue aportado por una empresa para su estudio en las instalaciones del Campus de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia.

Los resultados académicos extraídos de estas dos sesiones de prácticas, comparando ambos métodos de medida de potencia, fueron la motivación para seguir estudiando diferentes procedimientos de medida de potencia, con diferentes rangos de exactitud, y bajo normativas UNE EN ISO.

Para ello deberíamos de elegir una fuente, también con motivación para el Ingeniero de Telecomunicaciones en Sonido e Imagen, y además, deberíamos de, no solamente ampliar los procedimientos de medida vistos en las prácticas, sino realizar un análisis detallada de la incertidumbre asociada a cada una de las medidas.

La fuente elegida fue, lo que se conoce en aislamiento acústico de la edificación, una fuente de fachada.

Se conoce como una fuente acústica de fachada el dispositivo que ha sido únicamente diseñado para la emisión de sonidos controlados para así poder evaluar las propiedades acústicas que existen en las fachadas de los edificios.

La función básica de este altavoz generalmente consiste en emitir sonidos a diferentes frecuencias y niveles de presión sonora, de modo que, gracias a su estructura, esto permite orientar y direccionar el sonido hacia la fachada del edificio de forma controlada y precisa. Esto se genera gracias a que se existe la posibilidad de ajustar la frecuencia del sonido emitido y así poder analizar cómo, dependiendo del rango de frecuencias, interactúan estas con la fachada. Y lo mismo pasa con el nivel de presión sonora, ya

que es posible controlar el volumen del sonido para así poder simular diversas condiciones acústicas, dependiendo de las necesidades o preferencias del consumidor.

Las normativas referentes a aislamiento acústico a ruido aéreo de fachadas (UNE EN ISO 16283-3: 2016. Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 3: Aislamiento a ruido de Fachada) hace referencia a este tipo de fuentes. Así pues, la importancia de conocer la potencia de la misma, queda más que justificada.

Este tipo de fuentes es una herramienta crucial para ingenieros y arquitectos en el campo de la acústica arquitectónica, permitiendo una evaluación precisa y controlada de las propiedades acústicas de las fachadas de los edificios.

En cuanto a la justificación de la elección y elaboración de este Trabajo de Fin de Grado (TFG), se deben tener en cuenta diferentes aspectos dentro de la acústica medioambiental.

El objetivo de este TFG es estudiar los diferentes procedimientos de medida que existen para conocer la potencia acústica de una fuente de ruido, y para ello, se ha utilizado una fuente de fachada. Los diferentes procedimientos utilizados son los descritos en las normas ISO:

- UNE EN ISO 3741:2011: Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio en cámaras reverberantes, 2011.
- UNE EN ISO 3744:2011: Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de fuentes de ruido utilizando presión acústica. Métodos de ingeniería para un campo esencialmente libre sobre un plano reflectante, 2011.
- UNE EN ISO 3745:2012: Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio para cámaras anecoicas y semi-anecoicas, 2012.

1.2. OBJETIVOS

Respecto a los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado, cabe mencionar la división entre dos tipos, por un lugar el principal, que abarca todas las expectativas tomadas globalmente, que en este caso sería la elaboración de diferentes procedimientos para la medida de la potencia acústica de una fuente acústica de fachada.

Por otra parte, también son importantes los objetivos específicos, que son las expectativas que se quieren conseguir, y en este caso serían:

- Investigar y documentarse sobre los métodos para las mediciones de la potencia acústica de fuentes de ruido.
- Desarrollar varios procedimientos para la medición de la potencia acústica de fuentes de ruido.
- Evaluar la incertidumbre asociada a cada uno de los procedimientos de medición de fuentes de ruido.
- Comparar los diferentes procedimientos en cuanto a los resultados obtenidos.

1.3. METODOLOGÍA

Las mediciones acústicas se podrían definir como un conjunto de métodos, que se usan para determinar diferentes parámetros acústicos. Se llevan a cabo con ayuda del uso de un medidor compuesto de un micrófono o sonda acústica. En el caso de este TFG todas las mediciones han sido realizadas con sonómetros tipo 1, de Bruel&Kjaer, modelo 2270. A pesar de que con estas mediciones se pueden obtener diferentes resultados, como por ejemplo los relacionados con los parámetros acústicos de salas, o mediciones de ruido y niveles de emisión, en este caso solo se tendrá en cuenta el estudio de mediciones relacionadas con el nivel de presión sonora, lo que nos permite conocer la potencia acústica.

Sabiendo esto, se deben definir las características del estudio acústico a realizar, teniendo en cuenta el origen del ruido, que en este caso será ruido continuo producido por la fuente en cuestión, y también la cantidad de posiciones de medida y el tiempo de cada una que se realizará, que dependiendo del tipo de entorno cambia, igual que cambia la normativa de referencia usada para cada medición. Los resultados obtenidos serán registrados dentro del sonómetro, mediante un software integrado en este.

Ya realizadas las mediciones pertinentes, se deben tener en cuenta las normativas que se adecúan a cada medida, que son las comentadas en el primer subapartado de este apartado, sabiendo que para cada entorno se necesitan realizar diferentes cálculos de presión acústica, con fórmulas distintas y con controles de calidad diferentes unos de otros. Todo esto para llegar a calcular la potencia acústica en cada caso, y así conseguir una incertidumbre diferente para cada medición y realizar una comparativa entre ellas de la manera más exacta posible.

Por último, se exponen todos estos resultados en los siguientes puntos de esta memoria, de manera que cada cálculo va acompañado de la fórmula que se ha usado para llegar a cada resultado, y el resultado en sí, con tablas que muestran el número de posiciones que se han realizado en cada medida, y también las frecuencias en las que se centran dichos cálculos.

2. MARCO TEÓRICO, LAS NORMATIVAS ISO

Sobre la Organización Internacional de Normalización (ISO), Lía González (2016), comenta que:

ISO es una organización internacional independiente, no gubernamental, en la que participan 161 organismos nacionales de normalización. Su función es la de promover el desarrollo de normas internacionales de fabricación, comercio y comunicación para todas las ramas industriales.

La ISO se fundó en 1947, con el objetivo de garantizar que los productos y servicios sean seguros, confiables y de buena calidad. Estos se definen a sí mismo como una red global de los normalizadores mejor cualificados del mundo. Su función se basa en gestionar documentos con trabajo de redacción, revisión, votación y publicación, para así concienciar al público sobre la importancia de las normas y la normalización,

participando en ayudas respecto a la formación de sus miembros para actuar como un recurso para la investigación de normas.

Para AENOR, la Asociación Española de Normalización y Certificación, se define norma como << un documento técnico de aplicación voluntaria, fruto del consenso, basado en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico y aprobado por un organismo de normalización reconocido >>.

Estas normas responden a una necesidad en el mercado, por lo que ISO no es realmente quien decide ni cuándo ni que norma se va a crear, sino que existen diferentes representantes nacionales que se comunican con esta organización para expresar la necesidad de una nueva norma ISO. Es por esto por lo que se basan en la opinión de expertos, creando comités técnicos, que negocian todos los aspectos de la norma, como su ámbito de aplicación y el contenido. Respecto a los comités que pertenecen a este estudio, se sabe que el Comité Técnico 43 es el encargado de la acústica, y el Subcomité 1, del ruido, junto con el Comité Técnico 29, encargado de la electroacústica, y el Subcomité 29C, que estudia los aparatos de medición.

Cyril M. Harris (1995), explica en su famoso *Manual de Medidas Acústica y Control de Ruido*, en el apartado de Normas de Medida y Código de Ensayo, el procedimiento que se lleva a cabo para el establecimiento de una normativa internacional, empezando por una propuesta de borrador, que puede partir de un único Organismo Miembro o de un grupo de trabajadores propuesto por la secretaría, los que actúan de acuerdo con la capacidad personal y no como representantes de la institución a la que pertenecen, pero esperando de ellos aportaciones con puntos de vista nacionales a las actividades del grupo de trabajo, para que las propias normas nacionales que se usan en la institución de cada uno, sean consideradas y utilizadas. De este borrador que se ha presentado, la secretaría realiza diferentes copias para que sea revisado y comentado por los Organismos Miembros ya comentados. El resultado de este procedimiento es un borrador revisado, el cual debe ser difundido por la Secretaría Central de Ginebra, con la autorización mediante voto por correo de los Organismos Miembros, como borrador de norma internacional ISO. Si la autorización sale afirmativa, la propuesta se imprime de forma casi definitiva y se distribuye para realizar una votación final, que en el caso de conseguir 75 de 100 votos de manera afirmativa por los miembros del organismo, la norma se somete a la aprobación del Consejo de la ISO, y con ayuda de los criterios del Comité de Revisión de Normas de la ANSI (American National Standards Institute), el Consejo decide, en último lugar, si la propuesta puede aceptarse para ser publicada como una Norma Internacional.

La primera norma ISO que se publicó fue la “ISO / R 1:1951”, en 1951, que se dedicaba a referenciar el estándar para realizar mediciones de longitud industrial, y sigue vigente en la actualidad, después de muchas actualizaciones, con el nombre de “ISO 1:2002”.

Más tarde, se crearon comités para poder crear y publicar nuevos estándares bajo el nombre de ISO, y así controlar las unidades de medida o la calidad ambiental, entre otros. Una de las normas más reconocidas en la actualidad es la “ISO 9001”, que fue creada en 1987, y fue la primera norma existente en cuanto a control de calidad de ISO.

Desde que apareció en 1996 la “ISO 14001”, centrada en sistema de gestión medioambiental, se ha aumentado la producción de nuevas orientaciones, llegando a campos como la seguridad de la información, responsabilidad social, gestión energética o incluso la integridad corporativa.

A pesar de que existen más de 20.000 normas, para las organizaciones existen unas pocas que son de gran relevancia. Dos de ellas ya se han comentado en este mismo documento, por una parte, la ISO 9001, que está formada por estándares que marcan directrices relacionadas con la calidad, que se aplican en las labores diarias de las empresas, y sirven para demostrar que ofrecen servicios y productos de calidad. Por otra parte, también es importante la ISO 14001, que se considera el marco de referencia que protege el medio ambiente en las empresas, con el objetivo de evaluar si las operaciones de una organización tienen algún tipo de impacto en el medio ambiente, introduciendo medidas para reducirlo. Así las empresas mejoran el rendimiento ecológico y optimizan los procesos dañando lo mínimo el entorno de actuación. La ISO 27001, encargada de la verificación de la seguridad de la información en empresas, es también importante por el establecimiento de medidas de protección de datos en los procesos de la organización, aportando tranquilidad a los usuarios del sistema. Para gestionar el cumplimiento de las obligaciones de una empresa, se usa la ISO 37301, que con introduce una guía de identificación de conflictos a los que se enfrentaría cada empresa por el incumplimiento de conductas o reglas. Por último, dentro de las normas más importantes, existe la ISO 45001, que hace referencia a los sistemas de gestión de la seguridad y salud de los empleados, reduciendo al máximo los riesgos relacionados con el trabajo y así mejorar las condiciones laborales de los trabajadores de la organización en cuestión.

Según la web de Unifikas¹, un software de gestión de cumplimiento de Normas ISO, los beneficios del cumplimiento de estas normas serían:

Cumplir con la normativa y disponer de las certificaciones ISO trae consigo una serie de beneficios para las organizaciones, como vamos a detallar a continuación:

1. Contribuye a lograr el proceso de mejora continua
2. Ayuda a garantizar la calidad de los productos y servicios
3. Supone un mayor control en el proceso productivo de la organización, lo que reduce las ineficiencias
4. Permite ahorrar costes y mejorar la productividad
5. Mejora la reputación de la marca con los stakeholders (*clientes, proveedores, partners...*)
6. Permite acceder a licitaciones que requieran disponer de certificaciones ISO
7. Supone una gran ventaja competitiva

También en la web de GlobalSuite Solutions², se comenta sobre las ventajas de implantar estas normas para las empresas es que:

Una de las ventajas importantes que logran las organizaciones con la implantación de las normas ISO, es aportar un valor diferencial frente a la competencia al tratarse de estándares certificados y reconocidos a nivel internacional, que son revisados y auditados de forma periódica con el fin de garantizar el cumplimiento de estos. Esto mejora la percepción de las empresas tanto para clientes como para accionistas, inversores o partners que puedan mostrar interés en ellas.

Elaboración de diferentes procedimientos para la medida de la potencia acústica de una fuente acústica de fachada | Pau Mayor Boronat
¹ Unifikas. (6 de febrero de 2023). ¿Qué son las Normas ISO? (<https://www.unifikas.com/es/noticias/que-son-las-normas-iso>)

² GlobalSuite Solutions. (28 de septiembre de 2023). ¿Qué son las normas ISO? (<https://www.globalsuitesolutions.com/es/que-son-normas-iso/>)

Otras mejoras importantes que se logran al implantar una norma ISO en una organización es la optimización de procesos al disponer de más datos y registros sobre los mismos, facilitando la toma de decisiones por parte de la dirección con información más concreta y verificable en todo momento. Además, se facilita la correcta adecuación a las normativas y requerimientos que se puedan tener de clientes u otras entidades y organizaciones pudiendo evidenciar el cumplimiento de estos de una forma documental y fiable, lo cual redundará en mayores niveles de confianza tanto de forma interna como a terceros.

La implantación de varias normas ISO en una organización cuenta con la ventaja añadida de la facilidad de integración entre ellas, proporcionando un marco común para todas y permitiendo la existencia de un único Sistema de Gestión.

Como se ha comentado anteriormente, las Normas ISO para llevar a cabo este TFG, serán las siguientes:

- UNE EN ISO 3741:2011: Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio en cámaras reverberantes, 2011. Esta norma, anula la UNE-EN ISO 3741:2010.
- UNE EN ISO 3744:2011: Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de fuentes de ruido utilizando presión acústica. Métodos de ingeniería para un campo esencialmente libre sobre un plano reflectante, 2011. Esta norma, anula la UNE-EN ISO 3744:2010 y la UNE 74102:1990.

UNE EN ISO 3745:2012: Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio para cámaras anecoicas y semi-anecoicas, 2012. Esta norma, anula la UNE-EN ISO 3745:2010.

3. MEDIDAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado, se procede a explicar los diferentes métodos en los que se han basado los cuatro procedimientos de medidas que se han realizado para así obtener los resultados respecto a la presión y potencia acústica, que es el objetivo principal de la parte práctica de este proyecto. Para cada una de las mediciones, se ha tomado como referencia la normativa que se rige a cada una de las diferentes situaciones en las que se ha realizado cada medida.

Para cada una de las mediciones, debido a que en siguientes apartados se va a necesitar realizar una comparación entre la potencia acústica de cada uno del tipo de medidas, se calcula también la incertidumbre de cada cálculo. Este cálculo de incertidumbre viene descrito para cada uno de los procedimientos por las propias ISOs.

3.1. MÉTODO DIRECTO DE LABORATORIO EN CÁMARAS REVERBERANTES

En este apartado se va a describir la medición realizada el 27 de febrero de 2024, en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Campus de Gandía (EPSG), basándose en la Norma ISO 3741:2010, documento en el que se describe esta como:

Esta norma internacional especifica métodos para determinar el nivel de potencia acústica o el nivel de energía acústica de una fuente de ruido a partir de los niveles de presión acústica medidos en una cámara reverberante. El nivel de potencia acústica (o, en el caso de ráfagas de ruido o emisiones de ruido transitorias, el nivel de energía acústica) producido por la fuente de ruido, en bandas de frecuencia de ancho un tercio de octava, se calcula utilizando estas mediciones, incluyendo las correcciones para permitir cualquier diferencia entre las condiciones meteorológicas en el momento y en el lugar de ensayo y aquellas correspondientes a una impedancia característica de referencia. Los procedimientos de mediciones y cálculos se indican tanto para un método directo como para un método de comparación de la determinación del nivel de potencia acústica y del nivel de energía acústica.

En este apartado 3.1, se describen los procedimientos y medidas cumpliendo con el método directo, que es el método que utiliza el área de absorción acústica equivalente de la cámara reverberante.

En este caso el entorno de medición para los cálculos de potencia acústica es una cámara reverberante, la que se encuentra en el edificio B de la Escuela Politécnica Superior de Gandía (EPSG), que se conoce como un espacio cerrado diseñado para crear un campo sonoro altamente difuso, que permite que las ondas sonoras se reflejen en múltiples direcciones, garantizando una distribución uniforme del sonido y por eso se utilizan principalmente para medir propiedades acústicas de materiales, evaluando parámetros como la absorción acústica a partir del tiempo de reverberación. Las dimensiones de la cámara en cuestión, y el aspecto de esta, se muestran en las siguientes imágenes (1 y 2):

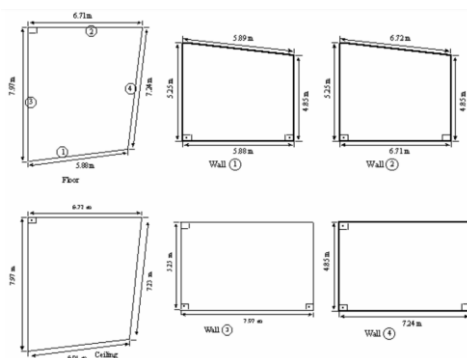


Imagen 1: Dimensiones de la cámara reverberante de la EPSG



Imagen 2: Aspecto de la cámara reverberante de la EPSG

Es necesario conocer el tiempo de reverberación para esta sala. Se ha utilizado el sonómetro con módulo “Timepo de Reverberación”, se necesita alimentar con señal a la fuente omnidireccional utilizada (OmniPower 4296 de Brüel&Kjaer), se debe conectar el sonómetro al generador de señal como si actuara de amplificador (por el input), generando un ruido rosa y conectar el altavoz al propio generador (por el output). La normativa nos indica diferentes aspectos a tener en cuenta para realizar esta medición, entre ellas:

- Se deben realizar dos posiciones de altavoz, siguiendo la geometría de la cámara reverberante, realizando las mediciones en dos esquinas diagonales de la sala.
- 6 posiciones de micrófono para cada posición de altavoz, con una distancia de más de 1,5m entre cada una y con una distancia de mínimo 1,5m desde dicha posición hasta la pared del recinto.
- Tres subidas de emisión de ruido para cada medida.

Además de los aspectos normativos citados anteriormente, se configuran las mediciones con los siguientes parámetros:

- Tiempo de subida de 10s, es decir 10s sonando por cada subida, en total 30s de ruido para cada medición.
- Tiempo de caída de 10s, es decir 10s de silencio entre cada subida.
- 3s de tiempo de escape, es decir que desde que le das al inicio de la medición hasta que empieza, debe pasar ese tiempo.
- Medición en un rango de frecuencias de 100Hz a 10.000Hz.

En la siguiente imagen (3) podemos observar cómo se realizó este estudio, en la cámara reverberante, con el altavoz omnidireccional y el micrófono conectado al sonómetro (este es controlado desde el exterior de la cámara)



Imagen 3: medición del TR e la cámara reverberante de la EPSG

Los resultados obtenidos de esta medición se muestran en la siguiente tabla (Tabla 1) (promediado de las 12 mediciones: 6 posiciones de micrófono por cada 2 posiciones de fuente):

	TR (s)
100Hz	8,8
125Hz	6,3
160Hz	5,7
200Hz	6,1
250Hz	6,6
315Hz	7,1
400Hz	7,3
500Hz	7,3
630Hz	7,4
800Hz	7,3
1kHz	7,0
1.25kHz	6,6
1.6kHz	6,0
2kHz	5,2
2.5kHz	4,4
3.15kHz	3,6
4kHz	2,9
5kHz	2,2
6.3kHz	1,6
8kHz	1,2
10kHz	0,9

Tabla 1: Tiempo de reverberación en la cámara reverberante de la EPSG el 27-2-24

Se necesitan los valores de la Tabla 1, para poder conocer la distancia mínima (d_{min}), que es la distancia mínima que deberá haber entre la fuente emisora de ruido, la fuente acústica de fachada en este caso, y las diferentes posiciones de micrófono para realizar las mediciones que la norma indique. Para ello, se sigue la siguiente fórmula (Fórmula 1):

$$d_{min} = D1 * \sqrt{\frac{V}{TR}} m$$

Fórmula 1: distancia mínima entre la fuente de ruido sometida a ensayo y la posición de micrófono más cercana, para cada banda de frecuencias de interés

Donde:

- **D1** = 0,08;
- **V** es el volumen, en metros cúbicos, de la cámara reverberante de ensayo (238 m³);
- **TR** es el tiempo de reverberación, en segundos.

Para TR, se debe escoger el valor más pequeño que se muestra en la Tabla 1, que serían unos 0,9 s, en la frecuencia más alta del rango de frecuencias a estudiar, y sabiendo que el volumen de la cámara reverberante es de 238 m³, podemos deducir que:

$$d_{min} = 0,08 * \sqrt{\frac{238}{8,8}} = 1,3 \text{ m}$$

El próximo paso será la medición del nivel de presión sonora en diferentes puntos, siguiendo las indicaciones de la ISO 3741:2010, siendo el emisor la fuente acústica de fachada (ESD-00127 de Brüel&Kjaer). Esta fuente no tiene alimentación propia, por lo que se necesita el uso del sonómetro como generador de señal en forma de ruido rosa, introduciendo estas ondas al amplificador en el Input, y conectar la fuente de fachada en el Output de este mismo aparato. El sonómetro, en este caso se usa con el módulo “Sonómetro o Sonómetro Avanzado “. Los aspectos a tener en cuenta para esta medición serán:

- Medición en 6 posiciones (como mínimo) de micrófono, a 1,5m del altavoz y a una distancia de 1,5m entre cada posición.
- Si es preciso, en caso de que los cálculos no concuerden con la normativa utilizada, se deben realizar más medidas en diferentes posiciones.
- Medir ruido de fondo para cada posición efectuada, sin la fuente acústica de fachada en funcionamiento.

A modo de muestra, en las siguiente Imagen 4, se puede observar tanto el recinto, como la fuente y el micrófono conectado al sonómetro con el que se realizó esta medición:



Imagen 4: Mediciones de potencia acústica en cámara reverberante

Ya realizadas estas mediciones, llega el momento de pasar los datos obtenidos por el sonómetro al software creado por Brüel&Kjaer, el cual gestiona los datos y elabora un documento de Excel con lo necesario para empezar con los cálculos de cada medición.

Es necesario conocer si con los puntos de medida definidos es suficiente para obtener un valor representativo. Para ello, la normativa indica que es necesario conocer la desviación típica (SM), calculada con la Fórmula 2, y si supera el valor de 1'5, se deben realizar más medidas en diferentes posiciones.

$$SM = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{M(pre)}} \frac{[L'_{pi(pre)} - L'_{pm(pre)}]^2}{N_{M(pre)} - 1}}$$

Fórmula 2: desviación típica según la Norma ISO 3741

Donde:

- **L'pi(pre)** es el nivel de presión sonora promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava, medido en la iésima posición inicial del micrófono, con la fuente de ruido sometida a ensayo en funcionamiento, en decibelios;
- **L'pm(pre)** es la media aritmética de los niveles de presión acústica promediados en el tiempo en banda de tercio de octava, medida en seis posiciones iniciales de micrófono, con la fuente de ruido sometida a ensayo en funcionamiento, en decibelios;
- **NM(pre)** es el número inicial de posiciones de micrófono.

A modo de comparación entre estos tres cálculos, se muestra la Tabla 2, en la que se comparan los resultados en el caso de cambiar el número de posiciones:

	SM 6 pos.	SM 12 pos.	SM 15 pos.
100 Hz	1,4	1,7	1,6
125 Hz	1,5	1,7	1,6
160 Hz	1,0	1,2	1,1
200 Hz	0,8	0,6	0,7
250 Hz	0,5	0,7	0,6
315 Hz	0,4	0,3	0,4
400 Hz	0,6	0,6	0,6
500 Hz	0,4	0,6	0,5
630 Hz	0,4	0,4	0,4
800 Hz	0,5	0,4	0,4
1000 Hz	0,6	0,5	0,5
1250 Hz	0,5	0,4	0,4
1600 Hz	0,7	0,6	0,5
2000 Hz	0,7	0,5	0,5
2500 Hz	0,6	0,5	0,4
3150 Hz	0,6	0,4	0,4
4000 Hz	0,6	0,5	0,4
5000 Hz	1,3	1,1	1,0
6300 Hz	1,7	1,3	1,2
8000 Hz	2,5	2,0	1,9
10000 Hz	3,5	2,8	2,5

Tabla 2: Cálculos de SM para diferentes posiciones de micrófono en cámara reverberante

En este último caso (15 posiciones) también se superan los 1'5 en diferentes rangos de frecuencia, pero en proporción es más estable con 15 posiciones que en los otros dos casos, por lo que los valores obtenidos para este caso serán con los que se realizarán los cálculos para conseguir el nivel de potencia acústica en el que se basa este estudio. También esto se debe a que, como se muestra en la Tabla 3 (obtenida de la normativa), como el valor de SM no supera el 3, 15 serán el máximo de posiciones de micrófono.

Frecuencia central de la banda de tercio de octava Hz	Desviación típica, s_M		
	dB		
	$s_M \leq 1,5$	$1,5 < s_M \leq 3$	$s_M > 3$
	Valor mínimo de N_M		
100, 125, 160	6	6	6
200, 250, 315		6	12
400, 500, 630		12	24
≥ 800		15	30

Tabla 3: Número mínimo de posiciones de micrófono para la medición de los niveles de presión acústica

El primer paso para el cálculo de la potencia acústica sería calcular las correcciones de ruido de fondo, para ello se debe seguir la siguiente Fórmula 3:

$$K1 = -10 * \log(1 - 10^{0,1 * \Delta L_{pi}}) \text{ dB}$$

Fórmula 3: corrección de ruido de fondo

Donde:

- $\Delta L_{pi} = L'_{pi(ST)} - L_{pi(B)}$, en la que:
 - **L'pi(ST)** es el nivel de presión acústica medido (no corregido) promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava, en la iésima posición de micrófono o para la iésima trayectoria de micrófono, con la fuente de ruido sometida a ensayo en funcionamiento, en decibelios;
 - **Lpi(B)** es el nivel de presión acústica promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava del ruido de fondo (B), medido en la iésima posición de micrófono o para la iésima trayectoria de micrófono, en decibelios.

De aquí se extrae la siguiente Tabla 4:

	Lp(ST) (dB)	Lp(B) (dB)	ΔL_{pi} (dB)
100 Hz	100,2	30,5	69,8
125 Hz	100,9	27,7	73,2
160 Hz	100,3	22,5	77,8
200 Hz	101,1	22,2	78,9
250 Hz	101,6	19,9	81,7
315 Hz	102,4	14,2	88,2
400 Hz	104,6	12,1	92,5
500 Hz	105,1	9,1	95,9
630 Hz	104,0	6,9	97,1

800 Hz	101,7	4,9	96,8
1000 Hz	102,1	4,8	97,4
1250 Hz	98,9	4,6	94,3
1600 Hz	100,7	5,6	95,1
2000 Hz	99,5	6,2	93,3
2500 Hz	95,8	6,8	89,0
3150 Hz	94,1	7,5	86,6
4000 Hz	94,7	8,3	86,5
5000 Hz	92,2	8,8	83,4
6300 Hz	89,6	9,3	80,4
8000 Hz	87,8	9,5	78,2
10000 Hz	84,6	9,5	75,1

Tabla 4: Diferencia entre nivel de presión sonora y ruido de fondo en la cámara reverberante de la EPSG

Como se indica en la Norma ISO 3741:

Si $\Delta L_{pi} \geq 15$ dB, K_1 se supone que es cero, y no se debe aplicar ninguna corrección para el ruido de fondo.

Revisando los valores de la tabla 4, para nuestro caso $K_1=0$ dB en todas las frecuencias. El próximo paso sería calcular el nivel de presión acústica corregido, mediante la siguiente Fórmula 4:

$$L_{pi(ST)} = L'_{pi(ST)} - K_1$$

Fórmula 4: Nivel de presión acústico corregido promediado

Donde:

- **$L'_{pi(ST)}$** es el nivel de presión acústica medido (no corregido) promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava, en la i ésima posición de micrófono o para la i ésima trayectoria de micrófono, con la fuente de ruido sometida a ensayo en funcionamiento, en decibelios;
- **K_1** es la corrección del ruido de fondo, en decibelios.

El resultado de este valor serían los valores que se muestran en la siguiente Tabla 5, y se podría suponer que sería lo mismo que el promedio de los valores obtenidos por el sonómetro cuando la fuente acústica de fachada, por el simple hecho de que como se ha comentado anteriormente, $K=0$ dB en todas las frecuencias:

	L _{pi} (ST) (dB)
100 Hz	100,2
125 Hz	100,9
160 Hz	100,3
200 Hz	101,1
250 Hz	101,6
315 Hz	102,4
400 Hz	104,6
500 Hz	105,1
630 Hz	104,0
800 Hz	101,7
1000 Hz	102,1

1250 Hz	98,9
1600 Hz	100,7
2000 Hz	99,5
2500 Hz	95,8
3150 Hz	94,1
4000 Hz	94,7
5000 Hz	92,2
6300 Hz	89,6
8000 Hz	87,8
10000 Hz	84,6

Tabla 5: Nivel de presión acústica corregido en la cámara reverberante de la EPSG

Por lo que respecta a los valores de niveles de presión acústica medios promediados en el tiempo en la cámara de ensayo, se puede deducir que serán los mismos que en el nivel de presión acústica corregido, mostrados en la Tabla 5, ya que no existe corrección de fondo. De todos modos, la información que se muestra en la Fórmula 5 sería como se calcula este nivel de presión acústica medio promediado que se comenta:

$$\overline{L_{p(ST)}} = 10 * \log \left[\frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} 10^{0,1 * L_{pi(ST)}} \right] dB$$

Fórmula 5: nivel de presión acústica medio promediado en el tiempo en la cámara de ensayo

Donde:

- **L_{pi}(ST)** es el nivel de presión acústica corregido promediado en el tiempo en la banda de tercio de octava en la iésima posición de micrófono o para la iésima trayectoria de micrófono, con la fuente de ruido sometida a ensayo en funcionamiento, en decibelios;
- **N_M** es el número de posiciones de micrófono o trayectorias de micrófono individuales.

Ya por último, con todo lo que se sabe y los datos medidos, se es capaz de calcular el nivel de potencia acústica para esta fuente de fachada en la cámara reverberante de la EPSG. Para hacer este cálculo, la norma nos proporciona la Fórmula 6:

$$L_W = \overline{L_{p(ST)}} + \left\{ 10 * \log \left(\frac{A}{A_0} \right) dB + 4,34 * \frac{A}{S} dB + 10 * \log \left(1 + \frac{S * c}{8 * V * f} \right) dB + C_1 + C_2 - 6dB \right\}$$

Fórmula 6: Nivel de potencia acústica de una cámara reverberante

Donde:

- **L_p(ST)** es el nivel de presión acústica medio corregido promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava en la cámara de ensayo con la fuente de ruido sometida a ensayo en funcionamiento, en decibelios;
- **A** es el área de absorción equivalente, en metros cuadrados, de la cámara, se calcula con la Fórmula 7:

$$A = \frac{55,26}{c} * \left(\frac{V}{TR} \right) m^2$$

Fórmula 7: Área de absorción de una cámara reverberante

- En el que **TR** es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara de ensayo reverberante en la frecuencia central de banda de la(s) medición(es);
- **A0** = 1 m²;
- **S** es el área total de la superficie, en metros cuadrados, de la cámara de ensayo reverberante;
- **c** es la velocidad, en metros por segundo, del sonido a la temperatura, θ , en grados centígrados, del aire en la cámara de ensayo reverberante en el momento del ensayo, que se calcula con la Fórmula 8:

$$c = 20,05 * \sqrt{273 + \theta} \text{ m/s}$$

Fórmula 8: Velocidad del sonido

- **V** es el volumen, en metros cúbicos, de la cámara de ensayo reverberante;
- **f** es la frecuencia central de la banda, en hercios, de la(s) medición(es);
- **C1** es la corrección de la magnitud de referencia, en decibelios, para tener en cuenta las diferentes magnitudes de referencia utilizadas para calcular el nivel de presión acústica en decibelios y el nivel de potencia acústica en decibelios, y es una función de la impedancia característica del aire en las condiciones meteorológicas en el momento y lugar de las mediciones, se muestra en la Fórmula 9 como se calcula:

$$C_1 = -10 * \log\left(\frac{p_s}{p_{s,0}}\right) dB + 5 * \log\left(\frac{273,5 + \theta}{\theta_0}\right) dB$$

Fórmula 9: Corrección de la magnitud de referencia

- **C2** es la corrección de la impedancia de radiación, en decibelios, para cambiar la potencia acústica real existente en las condiciones meteorológicas en el momento y lugar de la medición a la potencia acústica en condiciones meteorológicas de referencia; el valor se debe obtener a partir del código de ensayo de ruido adecuado, pero en ausencia de un código de ensayo de ruido, la siguiente ecuación es válida para una fuente monopolar, y es un valor medio para otras fuentes, se muestra en la Fórmula 10 como se calcula:

$$C_2 = -10 * \log\left(\frac{p_s}{p_{s,0}}\right) dB + 15 * \log\left(\frac{273,5 + \theta}{\theta_1}\right) dB$$

Fórmula 10: Corrección de impedancia de radiación

En la cual:

- **ps** es la presión estática, en kilopascales, en la cámara de ensayo en el momento del ensayo,
- **ps,0** es la presión estática de referencia, 101,325 kPa,
- **θ** es la temperatura del aire, en grados centígrados, en la cámara de ensayo en el momento del ensayo,
- **θ0** = 314 K,
- **θ1** = 296 K.

A continuación, se muestran en la Tabla 6 los valores de los factores de los que dependen los cálculos a realizar:

Ao	1 m ²
Superficie de la cámara	236 m ²
Volumen de la cámara	238 m ³
Temperatura	18,8 °C
Presión atmosférica	100,845 KPa
Po,s	101,325 KPa
Velocidad de sonido	342,5 m/s
θo	314,0 K
θ1	296,0 K

Tabla 6: Valores para el cálculo del nivel de potencia acústica en la cámara reverberante de la EPSG

Los valores de temperatura y presión atmosférica en la cámara reverberante se realizaron con la ayuda de una sonda de presión y temperatura, y los resultados se muestran en las siguiente Imagen 5:

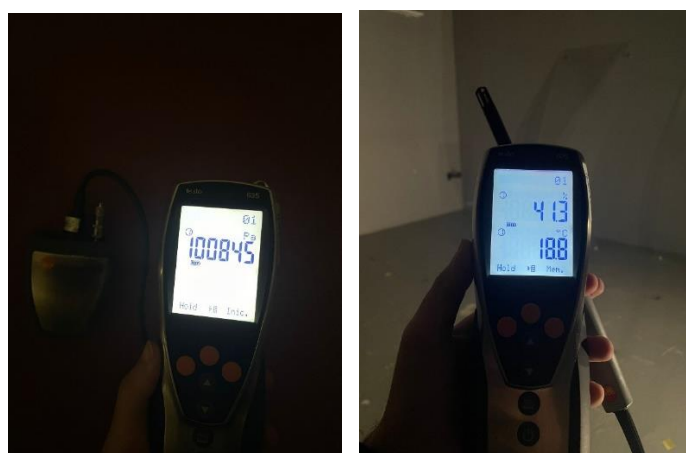


Imagen 5: Medición de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa en la cámara reverberante de la EPSG el 27-2-24

Así, ya se podrían calcular en primer lugar los valores de corrección, en primer lugar, el de la magnitud de referencia:

$$C_1 = -10 * \log\left(\frac{100,845}{101,325}\right) dB + 5 * \log\left(\frac{273,5 + 18,8}{314}\right) = -0,1 dB$$

Y para la corrección de la impedancia de radiación:

$$C_2 = -10 * \log\left(\frac{100,845}{101,325}\right) dB + 15 * \log\left(\frac{273,5 + 18,8}{296}\right) = -0,1 dB$$

También se calcula el área de absorción, que depende del volumen de la sala y del tiempo de reverberación, el cual se ha calculado en la Tabla 1 de esta memoria. Estos valores se muestran en la siguiente Tabla 7:

	A (m ²)
100 Hz	4,4
125 Hz	6,1
160 Hz	6,7
200 Hz	6,3
250 Hz	5,8
315 Hz	5,4

400 Hz	5,3
500 Hz	5,3
630 Hz	5,2
800 Hz	5,3
1000 Hz	5,5
1250 Hz	5,8
1600 Hz	6,4
2000 Hz	7,4
2500 Hz	8,7
3150 Hz	10,6
4000 Hz	13,4
5000 Hz	17,7
6300 Hz	24,5
8000 Hz	32,8
10000 Hz	43,8

Tabla 7: Área de absorción de la cámara reverberante de la EPSG el 27-2-24

De este modo, ya se puede calcular el nivel de potencia acústica, y sus valores se muestran en la siguiente Tabla 8:

	LW 3741 directo (dB)
100 Hz	100,6
125 Hz	102,7
160 Hz	102,5
200 Hz	103,0
250 Hz	103,1
315 Hz	103,6
400 Hz	105,7
500 Hz	106,1
630 Hz	104,9
800 Hz	102,8
1000 Hz	103,3
1250 Hz	100,4
1600 Hz	102,6
2000 Hz	102,0
2500 Hz	99,0
3150 Hz	98,2
4000 Hz	99,8
5000 Hz	98,5
6300 Hz	97,3
8000 Hz	96,7
10000 Hz	94,8

Tabla 8: Nivel de potencia acústica en la cámara reverberante de la EPSG

Como comenta Ana Isabel Tarrero (2013), en el 44º Congreso de Español de Acústica:

La incertidumbre del resultado de una medición refleja la imposibilidad de conocer exactamente el valor del mensurando y es un parámetro asociado al resultado de

una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando.

Pues bien, en esta Norma ISO 3741, se define la incertidumbre de medición acústica con la siguiente Fórmula 11:

$$U = k * \sigma_{tot} \text{ dB}$$

Fórmula 11: Incertidumbre de medición acústica

Sabiendo que en todos los casos, el valor de k es siempre 2, y que la desviación típica total (σ_{tot}) se conoce como se muestra en la Fórmula 12:

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{R0}^2 + \sigma_{omc}^2}$$

Fórmula 12: Desviación típica total

Y claro, la desviación típica (σ_{omc}), se obtiene con los cálculos obtenidos para la Fórmula 13:

$$\sigma_{omc} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (L_{p,j} - L_{pav})^2} \text{ dB}$$

Fórmula 13: desviación típica

Donde:

- **L_{pj}** es el nivel de presión acústica medido en una posición prescrita, y corregido para el ruido de fondo para la jésima repetición de las condiciones de montaje y de funcionamiento prescritas;
- **L_{pav}** es el nivel medio aritmético calculado para todas estas repeticiones.

También se sabe, con ayuda de la Tabla 9 que se ha sacado de la normativa en cuestión, que el valor de la desviación típica de reproducibilidad del método (σ_{R0}), depende del grado de precisión de medida, por lo que en todos los casos, en cualquier medida, posición de micrófono o frecuencia, el valor de esta desviación típica será siempre 0,5.

Desviación típica de reproducibilidad del método, σ_{R0} , dB	Condiciones de montaje y de funcionamiento		
	estable	inestable	muy inestable
	Desviación típica, σ_{omc} , dB		
	0,5	2	4
Desviación típica total, σ_{tot} , dB			
0,5 (Grado de precisión 1)	0,7	2,1	4,0
1,5 (Grado de precisión 2)	1,6	2,5	4,3
3 (Grado de precisión 3)	3,0	3,6	5,0

Tabla 9: Ejemplos de desviaciones típicas totales calculadas σ_{tot} para tres casos diferentes

Entonces, sabiendo todos estos datos, es fácil extraer la incertidumbre de las mediciones realizadas en este apartado, en la cámara reverberante de la EPSG, y estos resultados se muestran en la Tabla 10:

	σ_{omc} (dB)	σ_{R0} (dB)	σ_{tot} (dB)	U (dB)
100 Hz	6,1	0,5	6,1	12,2
125 Hz	6,5	0,5	6,5	13,0
160 Hz	5,0	0,5	5,0	10,1
200 Hz	5,6	0,5	5,6	11,2
250 Hz	6,0	0,5	6,0	12,1
315 Hz	4,2	0,5	4,2	8,4
400 Hz	3,9	0,5	4,0	7,9
500 Hz	2,8	0,5	2,8	5,6
630 Hz	1,9	0,5	1,9	3,9
800 Hz	1,4	0,5	1,5	3,0
1000 Hz	0,9	0,5	1,0	2,0
1250 Hz	0,5	0,5	0,7	1,4
1600 Hz	0,6	0,5	0,8	1,5
2000 Hz	0,5	0,5	0,7	1,4
2500 Hz	0,5	0,5	0,7	1,4
3150 Hz	0,4	0,5	0,7	1,3
4000 Hz	0,5	0,5	0,7	1,4
5000 Hz	1,1	0,5	1,2	2,3
6300 Hz	1,3	0,5	1,4	2,8
8000 Hz	2,1	0,5	2,1	4,2
10000 Hz	2,8	0,5	2,9	5,7

Tabla 10: Cálculo de la incertidumbre de medición acústica, con los valores de desviación típica, para el método directo

3.2. MÉTODO DE COMPARACIÓN DE LABORATORIO EN CÁMARAS REVERBERANTES

En este caso, también se va a tomar como referencia la Norma ISO 3741, como en el subapartado anterior, en el que ya se explica tanto en que se basa dicha normativa, como el recinto en el que se realizarán las mediciones en cuestión, la cámara reverberante de la EPSG.

A diferencia del caso anterior, en el que se estudiaba el método directo, ahora se tendrá en cuenta el otro método de laboratorio que se comenta en la norma, el método de comparación, que es el método que utiliza una fuente acústica de referencia con nivel de potencia acústica conocido.

Para este caso, la fuente de referencia será la Brüel&Kjaer 4224. Esta fuente, comercialmente ya está descatalogada, pero ha sido utilizada por el equipo de acústica del Campus de Gandía de la Universitat Politècnica de València durante largo tiempo para mediciones acústicas de edificios, como índice de reducción de sonido, aislamiento de fachadas, tiempo de reverberación y absorción. Tiene el aspecto que se muestra en la Imagen 6:



Imagen 6: Fuente 4224 de Brüel&Kjaer

Ya sabiendo el TR de la sala donde se realizará el estudio, como se muestra en la Tabla 1, no hace falta volver a realizar dicho estudio, ya que con estos valores se pueden realizar los cálculos que se precisan. Por eso, al tratarse del mismo recinto y el mismo valor mínimo de TR (0,9 s), el cálculo de distancia mínima (d_{min}) entre la fuente que emite ruido y las diferentes posiciones de micrófono, que se realiza mediante la Fórmula 1, será del mismo valor (1,3 m).

El rango de frecuencias sigue siendo el mismo, por el hecho de que, a pesar de cambiar de método de cálculo, las mediciones se realizan del mismo modo. Por eso, el rango frecuencial para este estudio será de 100Hz a 10KHz.

Para realizar las mediciones mediante este método, se seguirán las mismas recomendaciones que se llevaron a cabo en el método directo, que se encuentran en la página 15 de esta misma memoria. Se muestra una fotografía del día de la medición en la cámara reverberante de la EPSG en la Imagen 7:



Imagen 7: Mediciones de potencia acústica en cámara reverberante con fuente de referencia

Para conocer la potencia de la fuente de referencia, se ha utilizado el método de comparación. En el Anexo A se muestran los aspectos más relevantes de este procedimiento. Se considera no reproducirlos en el texto de este TFG (Trabajo de Fin de Grado) ya que es el mismo que el indicado en el apartado 3.1.

En la tabla A.5 se muestra el nivel de potencia obtenido (Anexo A) para la fuente de referencia Brüel&Kjaer 4224.

Con esto, queda calcular el nivel de potencia acústica haciendo uso de la fuente acústica de la referencia, con el método de comparación, con ayuda de la Fórmula 16:

$$L_W = L_{W(RSS)} + (\overline{L_{p(ST)}} - \overline{L_{p(RSS)}}) + C_2 \text{ dB}$$

Fórmula 16: Nivel de potencia acústica haciendo uso de la fuente acústica de referencia

Donde:

- **LW(RSS)** es el nivel de potencia acústica de la banda de tercio de octava de la fuente acústica de referencia, determinado de acuerdo con la Norma ISO 6926 y corregido a las condiciones meteorológicas en el momento del ensayo, en decibelios, pero en este caso, al no haber cumplido las normas de medición de la 6926, se usará la Fórmula 6 para conseguir este resultado;
- **Lp(ST)** es el nivel de presión acústica medio corregido promediado en el tiempo en la banda de tercio de octava en la cámara de ensayo, a partir de la fuente de ruido sometida a ensayo, en decibelios;
- **Lp(RSS)** es el nivel de presión acústica promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava del ruido de fondo medio en la cámara de ensayo, de la fuente acústica de referencia, en decibelios;
- **C2** se calcula haciendo uso de la Fórmula 10, usada para el método directo también.

En la Tabla 5 se muestra el nivel de presión acústica medio corregido, que junto con los valores de la Tabla 37 (del Anexo B) respecto la fuente de referencia, y los de la Tabla 38 (del Anexo B), acabados de calcular, podremos deducir con ayuda de la Fórmula 16 el valor del nivel de presión acústica haciendo uso de una fuente de referencia y el método de comparación de la Norma ISO 3741, como se muestra en la Tabla 11:

	LW 3741 comparación (dB)
100 Hz	100,5
125 Hz	102,6
160 Hz	102,4
200 Hz	102,9
250 Hz	103,0
315 Hz	103,5
400 Hz	105,5
500 Hz	106,0
630 Hz	104,8
800 Hz	102,7
1000 Hz	103,2
1250 Hz	100,3
1600 Hz	102,5
2000 Hz	101,9
2500 Hz	98,9
3150 Hz	98,1
4000 Hz	99,7
5000 Hz	98,4
6300 Hz	97,2
8000 Hz	96,6
10000 Hz	94,7

Tabla 11: Cálculo de los niveles de potencia acústica haciendo uso de la fuente acústica de referencia

Como en el caso anterior, para el método de comparación también se debe calcular la incertidumbre, y se hace mediante las mismas fórmulas, por eso se deben tener en cuenta la Fórmula 11, que comenta la incertidumbre acústica medida (U), la Fórmula 12, que describe como calcular la desviación típica total (σ_{tot}), la Fórmula 13, para saber los valores de la desviación típica (σ_{omc}) en cada frecuencia, y también la desviación típica reproducida por el método (σ_{R0}), con ayuda de la Tabla 9. El resultado de todos los cálculos realizados sería la siguiente Tabla 12:

	σ_{omc} (dB)	σ_{R0} (dB)	σ_{tot} (dB)	U (dB)
100 Hz	3,2	0,5	3,2	6,5
125 Hz	3,8	0,5	3,8	7,6
160 Hz	3,5	0,5	3,6	7,1
200 Hz	2,8	0,5	2,8	5,6
250 Hz	2,2	0,5	2,3	4,5
315 Hz	1,7	0,5	1,8	3,5
400 Hz	3,6	0,5	3,6	7,2
500 Hz	1,5	0,5	1,6	3,1
630 Hz	1,2	0,5	1,3	2,6
800 Hz	0,7	0,5	0,8	1,7
1000 Hz	0,6	0,5	0,8	1,6
1250 Hz	0,5	0,5	0,7	1,5
1600 Hz	0,5	0,5	0,7	1,4
2000 Hz	0,5	0,5	0,7	1,5
2500 Hz	0,5	0,5	0,7	1,4
3150 Hz	0,4	0,5	0,6	1,3
4000 Hz	0,9	0,5	1,0	2,0
5000 Hz	0,8	0,5	0,9	1,8
6300 Hz	1,0	0,5	1,1	2,2
8000 Hz	1,9	0,5	1,9	3,9
10000 Hz	2,0	0,5	2,0	4,0

Tabla 12: Cálculo de la incertidumbre de medición acústica, con los valores de desviación típica, para el método de comparación

3.3. CÁMARA ANECOICA

En esto apartado se va a describir la medición realizada el 12 de abril de 2024, en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Campus de Gandía (EPSG), basándose en la Norma ISO 3745:2012, documento en el que se describe esta como:

Esta norma internacional especifica métodos para medir los niveles de presión acústica sobre una superficie de medición que envuelve una fuente de ruido (maquinaria o equipo) en cámaras anecoicas y semianecoicas. El nivel de potencia acústica (o, en el caso de emisiones de ruido transitorias, el nivel de energía acústica) producido por la fuente de ruido, en bandas de frecuencia con ancho de un tercio de octava o con ponderación frecuencial A aplicada, se calcula utilizando dichos métodos, incluyendo las correcciones que permiten tener en cuenta diferencias entre las condiciones meteorológicas en el momento y el lugar del ensayo y las correspondientes a una impedancia acústica

característica de referencia. En este caso, se realizarán las medidas cumpliendo con el método directo, que es el método que utiliza el área de absorción acústica equivalente de la cámara reverberante.

Como se comenta, en este caso el entorno de medición para los cálculos de potencia acústica es una cámara anecoica, la que se encuentra en el edificio B de la Escuela Politécnica Superior de Gandía (EPSG). El diseño de esta cámara es de paredes, techo y suelo cubiertos con materiales que absorben el sonido, que permite realizar pruebas precisas de equipos de audio, investigación acústica y desarrollo de productos relacionados con el sonido, creando un entorno controlado y completamente silencioso y libre de reflexiones. El aspecto de la cámara en cuestión se muestra en la siguiente Imagen 8:

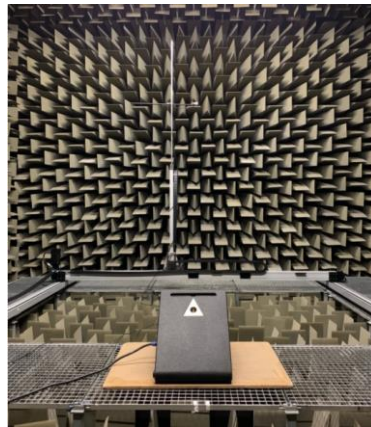


Imagen 8: Aspecto de la cámara anecoica de la EPSG

En la norma se especifica que:

El rango de frecuencias de interés incluye las bandas de un tercio de octava con frecuencias centrales desde los 100 Hz hasta los 10 000 Hz.

Con las explicaciones realizadas en cuanto a la normativa a usar y la cámara que servirá como recinto de medición, se procede a realizar las mediciones pertinentes para conocer el nivel de potencia acústico adaptándose a este nuevo entorno. Como en los otros dos casos, se usa el sonómetro como aparato principal de medida. Ya se ha comentado el hecho de que para hacer funcionar la fuente acústica de fachada a estudiar (la ESD-00127 de Brüel&Kjaer) hace falta alimentarla con señal que viene reproducida por el sonómetro, que se configura como un generador de señal en forma de ruido rosa, que se conecta a un amplificador de señal para que este luego alimente el altavoz y el sonido se pueda emitir con la mayor calidad posible. Para esta medición, se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Se debe utilizar un conjunto de 20 posiciones de micrófono, basándose en los valores de la Tabla 13, ya que con ellos se representa el contorno de una esfera que servirá para realizar la medición correctamente.
- En el caso de que los cálculos en cuanto al ruido de fondo no concuerden, se deben sustituir unas posiciones por otras.
- Seguir los valores numéricos de la Tabla 13 en cuanto a las distancias de medición entre la fuente y el micrófono.
- Realizar las medidas situando la fuente encima de un plano reflectante (como se muestra en la Imagen 8).

Número de posición	x/r	y/r	z/r
1	-0,999	0	0,050
2	0,494	-0,856	0,150
3	0,484	0,839	0,250
4	-0,468	0,811	0,350
5	-0,447	-0,773	0,450
6	0,835	0	0,550
7	0,380	0,658	0,650
8	-0,661	0	0,750
9	0,263	-0,456	0,850
10	0,312	0	0,950
11	0,999	0	-0,050
12	-0,494	0,856	-0,150
13	-0,484	-0,839	-0,250
14	0,468	-0,811	-0,350
15	0,447	0,773	-0,450
16	-0,835	0	-0,550
17	-0,380	-0,658	-0,650
18	0,661	0	-0,750
19	-0,263	0,456	-0,850
20	-0,312	0	-0,950
21	0,999	0	0,050
22	-0,494	-0,856	0,150
23	-0,484	0,839	0,250
24	0,468	0,811	0,350
25	0,447	-0,773	0,450
26	-0,835	0	0,550
27	-0,380	0,658	0,650
28	0,661	0	0,750
29	-0,263	-0,456	0,850
30	-0,312	0	0,950
31	-0,999	0	-0,050
32	0,494	0,856	-0,150
33	0,484	-0,839	-0,250
34	-0,468	-0,811	-0,350
35	-0,447	0,773	-0,450
36	0,835	0	-0,550
37	0,380	-0,658	-0,650
38	-0,661	0	-0,750
39	0,263	0,456	-0,850
40	0,312	0	-0,950

Tabla 13: Posiciones de micrófono según el Anexo D de la Norma ISO 3745:2012

Como es de esperar, de estas 40 posibles posiciones, se deben escoger 20 en primer lugar. Para este caso, al aportar menor dificultad en las medidas, se descartan las posiciones en el que el valor del eje Y es negativo, ya que las mediciones no se podían realizar donde esté la espuma de la cámara anecoica. Por eso, las primeras 20 posiciones factibles para crear la semiesfera de medición que se escogieron son las mostradas en la siguiente Tabla 14:

Número de posición	X	Y	Z
1	-0,99	0	0,05
3	0,484	0,839	0,250
4	0,468	0,811	0,350
6	0,835	0	0,55
7	0,380	0,658	0,65
8	-0,661	0	0,75
10	0,312	0	0,95
11	0,999	0	-0,05
12	-0,494	0,856	-0,150
15	0,447	0,773	-0,450
16	-0,835	0	-0,55
18	0,661	0	-0,75
19	-0,263	0,456	-0,85
20	-0,321	0	-0,95
21	0,999	0	0,05
23	-0,484	0,839	0,25
24	0,468	0,811	0,35
26	-0,835	0	0,55
27	-0,380	0,658	0,65
28	0,661	0	0,75

Tabla 14: Posiciones escogidas para realizar las medidas, extraído de la Tabla 17

El centro de medida (0,0,0), se encuentra en el centro del altavoz. Conociendo las medidas de la fuente acústica de fachada, que serían 0,407m de alto y ancho, y 0,52m de largo, se deben modificar estos valores de la Tabla 14, desplazándolas al ajustarse a nuestro centro de referencia. Con esto, para empezar las mediciones se tendrán en cuenta los valores de la siguiente Tabla 15:

Número de posición	X	Y	Z
1	-0,795	0	0,05
3	0,28	0,839	0,250
4	-0,264	0,811	0,350
6	0,631	0	0,55
7	0,176	0,658	0,65
8	-0,457	0	0,75
10	0,108	0	0,95
11	0,795	0	-0,05
12	0,29	0,856	-0,150
15	0,243	0,773	-0,450
16	-0,631	0	-0,55
18	0,457	0	-0,75
19	0,059	0,456	-0,85
20	-0,108	0	-0,95
21	0,795	0	0,05
23	-0,28	0,839	0,25
24	0,264	0,811	0,35
26	-0,631	0	0,55
27	-0,584	0,658	0,65
28	0,457	0	0,75

Tabla 15: Modificación de la Tabla 24 para la medición

Con los puntos de medición localizados, ya se puede empezar con las mediciones necesarias para obtener el nivel de potencia acústica en la cámara anecoica. Se muestra la Imagen 9 del día de la medición:



Imagen 9: Mediciones en la cámara anecoica de la EPSG

Ya realizadas estas mediciones de niveles de ruido de fondo, tal y como lo indica la normativa de referencia, llega el momento de pasar los datos obtenidos por el sonómetro al software creado por Brüel&Kjaer, el cual gestiona los datos y elabora un documento de Excel con lo necesario para empezar con los cálculos de cada medición.

El primer paso será comprobar los valores máximos que marca la Norma ISO 3745:2012 para el ruido de fondo a modo de referencia, que se muestran en la Tabla 16:

Frecuencia central del tercio de octava Hz	Máximo nivel de presión acústica en la banda dB
50	44
63	38
80	32
100	27
125	22
160	16
200	13
250	11
315	9
400	8
500	7
630	7
800	7
1 000	7
1 250	7
1 600	7
2 000	7
2 500	8
3 150	8
4 000	8
5 000	8
6 300	8
8 000	12
10 000	14
12 500	11
16 000	46
20 000	46

Tabla 16: Niveles de ruido de fondo máximos en recintos de ensayo para criterios absolutos

De esta primera ronda de medidas, en la Tabla 17 se muestran los valores de ruido de fondo (valores promediados para los 20 puntos de medida que se muestran en la tabla 15) y de niveles máximos permitidos por la norma:

	PROMEDIO R.F.			REFERENCIA	¿SIRVE?
100Hz	10,1	COMPARAMOS CON REFERENCIA	100Hz	27,0	SÍ
125Hz	10,1		125Hz	22,0	SÍ
160Hz	10,7		160Hz	16,0	SÍ
200Hz	11,8		200Hz	13,0	SÍ
250Hz	9,7		250Hz	11,0	SÍ
315Hz	9,8		315Hz	9,0	NO
400Hz	8,1		400Hz	8,0	NO
500Hz	8,6		500Hz	7,0	NO
630Hz	8,4		630Hz	7,0	NO
800Hz	8,6		800Hz	7,0	NO
1kHz	10,1		1kHz	7,0	NO
1.25kHz	9,9		1.25kHz	7,0	NO
1.6kHz	9,5		1.6kHz	7,0	NO
2kHz	10,4		2kHz	7,0	NO
2.5kHz	11,0		2.5kHz	8,0	NO
3.15kHz	12,5		3.15kHz	8,0	NO
4kHz	11,9		4kHz	8,0	NO
5kHz	13,7		5kHz	8,0	NO
6.3kHz	13,7		6.3kHz	8,0	NO
8kHz	13,2		8kHz	12,0	NO
10kHz	12,9		10kHz	14,0	SÍ

Tabla 17: Valores de ruido de fondo en comparación con la referencia de la Tabla 26

Como se puede observar, no sirven la mayoría estos valores, por lo que se deben detectar cuáles serán las mediciones que más afectan al promedio del ruido de fondo. Por eso, se escogen las posiciones 3, 4, 10, 12 y la 27, que serán sustituidas por las siguientes posiciones de la Tabla 18, que muestra los valores de cada eje, ya realizada la modificación del eje X comentada anteriormente:

Número de posición	X	Y	Z
30	-0,108	0	0,95
31	-0,795	0	-0,05
32	0,29	0,856	-0,15
35	-0,243	0,773	-0,45
36	0,631	0	-0,55

Tabla 18: Nuevas posiciones para la medición

Ahora se deben realizar los mismos cálculos respecto a la Tabla 17, pero con la sustitución de los valores de la Tabla 18, eso nos da como resultado la Tabla 18:

	PROMEDIO R.F.			REFERENCIA	¿SIRVE?
100Hz	7,0	COMPARAMOS CON REFERENCIA	100Hz	27,0	SÍ
125Hz	6,8		125Hz	22,0	SÍ
160Hz	6,3		160Hz	16,0	SÍ
200Hz	7,1		200Hz	13,0	SÍ
250Hz	7,2		250Hz	11,0	SÍ
315Hz	8,1		315Hz	9,0	SÍ
400Hz	6,0		400Hz	8,0	SÍ
500Hz	5,2		500Hz	7,0	SÍ
630Hz	4,8		630Hz	7,0	SÍ
800Hz	4,8		800Hz	7,0	SÍ
1kHz	5,9		1kHz	7,0	SÍ
1.25kHz	6,3		1.25kHz	7,0	SÍ
1.6kHz	6,2		1.6kHz	7,0	SÍ
2kHz	7,0		2kHz	7,0	SÍ
2.5kHz	7,5		2.5kHz	8,0	SÍ
3.15kHz	8,6		3.15kHz	8,0	NO
4kHz	9,2		4kHz	8,0	NO
5kHz	9,7		5kHz	8,0	NO
6.3kHz	10,8		6.3kHz	8,0	NO
8kHz	11,0		8kHz	12,0	SÍ
10kHz	11,7		10kHz	14,0	SÍ

Tabla 19: Valores de ruido de fondo en comparación con la referencia de la Tabla 16, realizando los cambios de la Tabla 18

Ahora ya sí que se pueden realizar los cálculos que se deban hacer, ya que la diferencia entre los valores obtenidos y la referencia no son tan dispares como anteriormente y se puede actuar de una manera correcta, teniendo en cuenta que, en los tercios de 3150 Hz, 4000 Hz 5000 Hz y 6300 Hz, no se cumple con las condiciones de la norma.

Así, como en las otras dos mediciones ya explicadas, el primer paso es calcular la corrección de ruido de fondo, que se realiza con la ayuda de la Fórmula 3, que usa la fórmula de $\Delta L_{pi} = L'_{pi(ST)} - L_{pi(B)}$, por lo que, en este caso, el valor obtenido sería el que se muestra en la Tabla 20:

	Lp(ST) (dB)	Lp(B) (dB)	ΔL_{pi} (dB)
100 Hz	88,6	7,0	81,6
125 Hz	88,2	6,8	81,4
160 Hz	88,2	6,3	81,9
200 Hz	88,0	7,1	80,9
250 Hz	87,8	7,2	80,6
315 Hz	90,4	8,1	82,3
400 Hz	93,4	6,0	87,4
500 Hz	93,9	5,2	88,7
630 Hz	92,3	4,8	87,5
800 Hz	89,8	4,8	85,0
1000 Hz	89,7	5,9	83,9

1250 Hz	87,3	6,3	81,0
1600 Hz	88,8	6,2	82,5
2000 Hz	89,7	7,0	82,7
2500 Hz	86,2	7,5	78,7
3150 Hz	87,3	8,6	78,7
4000 Hz	89,7	9,2	80,6
5000 Hz	87,9	9,7	78,2
6300 Hz	87,0	10,8	76,2
8000 Hz	86,0	11,0	75,0
10000 Hz	85,7	11,7	74,0

Tabla 20: Diferencia entre nivel de presión sonora y ruido de fondo en la cámara anecoica de la EPSG

En la norma de referencia para este apartado se comenta que en el caso de que el valor de $\Delta L_{pi} \geq 15$ dB, K1 se interpreta que es 0, y como se muestra en la Tabla 20, ninguno de los valores está por debajo de esta condición, por lo que, para todas las frecuencias, K1=0.

El siguiente paso es realizar los cálculos de nivel de presión acústica promediado en el tiempo, con ayuda de la Fórmula 17 se realiza este cálculo:

$$\overline{L_p} = 10 * \log \left[\frac{1}{N_M} * \sum_{i=1}^{N_M} 10^{0,1 * L_{pi}} \right] dB$$

Fórmula 17: Nivel de presión acústica promediado en tiempo para cámara anecoica

Donde:

- $L_{pi} = L'_{pi} - K1$, en el que:
 - **L'pi** es el nivel de presión acústica medido (no corregido) promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava, en la iésima posición de micrófono o para la iésima trayectoria de micrófono, con la fuente de ruido sometida a ensayo en funcionamiento, en decibelios;
 - **K1** es la corrección del ruido de fondo, en decibelios.
- NM es el número de posiciones de micrófono.

Se podría considerar que L'pi es el valor obtenido por parte del sonómetro para cada frecuencia, en cada posición de micrófono. Por eso, la Tabla 21 muestra el resultado de nivel de presión acústica promediado en el tiempo:

	$\overline{L_p}$ (dB)
100 Hz	88,6
125 Hz	88,2
160 Hz	88,2
200 Hz	88,0
250 Hz	87,8
315 Hz	90,4
400 Hz	93,4
500 Hz	93,9
630 Hz	92,3
800 Hz	89,8
1000 Hz	89,7

1250 Hz	87,3
1600 Hz	88,8
2000 Hz	89,7
2500 Hz	86,2
3150 Hz	87,3
4000 Hz	89,7
5000 Hz	87,9
6300 Hz	87,0
8000 Hz	86,0
10000 Hz	85,7

Tabla 21: Nivel de presión acústica promediado en el tiempo para la cámara anecoica de la EPSG

La próxima fase sería ya el cálculo del nivel de potencia acústica para la cámara anecoica, que se realiza con la ayuda de la siguiente Fórmula 18:

$$L_W = \overline{L_p} + 10 * \log\left(\frac{S_1}{S_0}\right) dB + C_1 + C_2 + C_3$$

Fórmula 18: Potencia acústica para cámara anecoica

Donde:

- **Lp** es el nivel de presión acústica superficial para la fuente de ruido sometida a ensayo, en decibelios;
- **S1** es el área de la superficie de medición esférica, en metros cuadrados;
- **S0** = 1 m²;
- **C1** es la corrección de la magnitud de referencia, en decibelios, para tener en cuenta las diferentes magnitudes de referencia utilizadas para calcular el nivel de presión acústica y el nivel de potencia acústica, y depende de la impedancia acústica característica del aire en condiciones meteorológicas en el momento y en el lugar de las mediciones, y se calcula con ayuda de la Fórmula 9;
- **C2** es la corrección de la impedancia de radiación acústica, en decibelios, para transformar la potencia acústica real pertinente para las condiciones meteorológicas en el momento y lugar de la medición en potencia acústica en condiciones meteorológicas de referencia, y se calcula con la Fórmula 10;
- **C3** es la corrección para la absorción del aire, en decibelios, a frecuencias específicas, y se calcula con la ayuda de la Fórmula 19:

$$C_3 = A_0 * (1,0053 - 0,0012 * A_0)^{1,6} dB$$

Fórmula 19: Corrección para la absorción del aire

○ En la que:

- **A0** es el valor numérico de $a(f)*r$, expresado en decibelios;
 - **a(f)** es el coeficiente de atenuación para la temperatura específica, para la humedad y la presión estática en función de la frecuencia de acuerdo con la Norma ISO 9613-1:1993, fórmulas (3) a (5), expresado en decibelios por metro;
 - **r** es el radio de medición, expresado en metros.

Para los tres tipos de corrección, hace falta saber diferentes valores en cuanto a aspectos externos a los obtenidos con el sonómetro, y serían los mostrados en la siguiente Tabla 22:

p0 (kPa)	Presión acústica de referencia	2,00E-05
Pc (N*s/m)	Impedancia acústica característica	411,5
P0 (kPa)	Potencia de referencia	1,00E-09
Ps (kPa)	Presión estática	102,888
ps,0 (kPa)	Presión estática de referencia	101,325
Θ (°C)	Temperatura	20,6
Θ0 (K)	Temperatura si la presión es como la de referencia	314
Θ1 (K)	Temperatura de referencia	296
S1 (m²)	Superficie de medición	4,42
S0 (m²)	Superficie imaginaria	1

Tabla 22: Valores para el cálculo de la potencia acústica en la cara anecoica de la EPSG

Algunas de las medidas de esa tabla se han obtenido de las mediciones realizadas por sonda de presión y temperatura, como se ve en la Imagen 10:



Imagen 10: Medición de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa en la cámara anecoica de la EPSG el 12-4-24

Para el cálculo de la superficie de medición (S1), se debe primero calcular la superficie de medición esférica, que anteriormente se ha comentado que con los puntos escogidos con la Tabla 13 (obtenida de la Norma ISO), se define el contorno de una esfera y después dividirlo por la mitad, ya que solo se usa la parte superior de la esfera, ya que en la inferior está el material absorbente de la cámara anecoica, se calcularía entonces con la Fórmula 20:

$$S_1 = \frac{4 * \pi * r^2}{2} m$$

Fórmula 20: Superficie de medición

Donde r es el radio de la esfera de medición, que será 0,839m, ya que es el valor más alto tanto del eje X, como del Y o el Z, que se observa en las Tabla 19 y Tabla 22. Por eso, el resultado será el obtenido en la Tabla 26.

Con estos valores, ya se pueden calcular las dos primeras correcciones, la de la magnitud de referencia y la de la impedancia de la radiación acústica, simultáneamente:

$$C_1 = -10 * \log\left(\frac{102,888}{101,325}\right) dB + 5 * \log\left(\frac{273,5 + 20,6}{314}\right) = -0,2 dB$$

$$C_2 = -10 * \log\left(\frac{102,888}{101,325}\right) dB + 15 * \log\left(\frac{273,5 + 20,6}{296}\right) = -0,1 dB$$

Para el cálculo de C3, se debe referenciar otra norma, la Norma ISO 9613-1:1993 (Atenuación del sonido durante la propagación al aire libre. Parte 1: Cálculo de la absorción del sonido por la atmósfera), la cual establece fórmulas y datos para evaluar cómo factores como la temperatura, la humedad y la frecuencia del sonido afectan la absorción del sonido en el aire, facilitando la predicción precisa de la propagación del sonido en entornos al aire libre. De esta norma, podemos obtener la siguiente Tabla 23, en la que se observan los diferentes valores de $a(f)$ que se pueden obtener dependiendo de la humedad y la temperatura del lugar de medición (como se observa en la Imagen 10):

(i) Air temperature: 20 °C											
Preferred frequency Hz	Relative humidity, %										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
50	$2,70 \times 10^{-1}$	$2,14 \times 10^{-1}$	$1,74 \times 10^{-1}$	$1,25 \times 10^{-1}$	$9,65 \times 10^{-2}$	$7,84 \times 10^{-2}$	$6,80 \times 10^{-2}$	$5,70 \times 10^{-2}$	$5,01 \times 10^{-2}$	$4,47 \times 10^{-2}$	$4,03 \times 10^{-2}$
63	$3,70 \times 10^{-1}$	$3,10 \times 10^{-1}$	$2,60 \times 10^{-1}$	$1,92 \times 10^{-1}$	$1,50 \times 10^{-1}$	$1,23 \times 10^{-1}$	$1,04 \times 10^{-1}$	$8,97 \times 10^{-2}$	$7,90 \times 10^{-2}$	$7,05 \times 10^{-2}$	$6,37 \times 10^{-2}$
80	$4,87 \times 10^{-1}$	$4,32 \times 10^{-1}$	$3,77 \times 10^{-1}$	$2,90 \times 10^{-1}$	$2,31 \times 10^{-1}$	$1,91 \times 10^{-1}$	$1,62 \times 10^{-1}$	$1,41 \times 10^{-1}$	$1,24 \times 10^{-1}$	$1,11 \times 10^{-1}$	$1,00 \times 10^{-1}$
100	$6,22 \times 10^{-1}$	$5,79 \times 10^{-1}$	$5,29 \times 10^{-1}$	$4,29 \times 10^{-1}$	$3,51 \times 10^{-1}$	$2,94 \times 10^{-1}$	$2,52 \times 10^{-1}$	$2,20 \times 10^{-1}$	$1,94 \times 10^{-1}$	$1,74 \times 10^{-1}$	$1,58 \times 10^{-1}$
125	$7,76 \times 10^{-1}$	$7,46 \times 10^{-1}$	$7,12 \times 10^{-1}$	$6,15 \times 10^{-1}$	$5,21 \times 10^{-1}$	$4,45 \times 10^{-1}$	$3,86 \times 10^{-1}$	$3,39 \times 10^{-1}$	$3,02 \times 10^{-1}$	$2,72 \times 10^{-1}$	$2,47 \times 10^{-1}$
160	$9,65 \times 10^{-1}$	$9,31 \times 10^{-1}$	$8,19 \times 10^{-1}$	$6,49 \times 10^{-1}$	$5,52 \times 10^{-1}$	$4,60 \times 10^{-1}$	$3,98 \times 10^{-1}$	$3,58 \times 10^{-1}$	$3,21 \times 10^{-1}$	$2,91 \times 10^{-1}$	$2,64 \times 10^{-1}$
200	1,22	1,14	1,14	1,12	1,05	$9,50 \times 10^{-1}$	$8,58 \times 10^{-1}$	$7,76 \times 10^{-1}$	$7,05 \times 10^{-1}$	$6,44 \times 10^{-1}$	$5,91 \times 10^{-1}$
250	1,58	1,39	1,39	1,42	1,39	1,32	1,23	1,13	1,04	$9,66 \times 10^{-1}$	$8,95 \times 10^{-1}$
315	2,12	1,74	1,69	1,75	1,78	1,75	1,68	1,60	1,50	1,41	1,33
400	2,95	2,23	2,06	2,10	2,19	2,23	2,21	2,16	2,08	2,00	1,90
500	4,25	2,97	2,60	2,52	2,63	2,73	2,79	2,80	2,77	2,71	2,63
630	6,26	4,12	3,39	3,06	3,13	3,27	3,40	3,48	3,52	3,52	3,49
800	9,36	5,92	4,62	3,84	3,77	3,89	4,05	4,19	4,31	4,39	4,43
1 000	$1,41 \times 10$	8,72	6,53	5,01	4,65	4,66	4,80	4,98	5,15	5,30	5,42
1 250	$2,11 \times 10$	$1,31 \times 10$	9,53	6,81	5,97	5,75	5,78	5,92	6,10	6,29	6,48
1 600	$3,13 \times 10$	$1,98 \times 10$	$1,42 \times 10$	9,63	8,00	7,37	7,17	7,18	7,31	7,48	7,68
2 000	$4,53 \times 10$	$2,99 \times 10$	$2,15 \times 10$	$1,41 \times 10$	$1,12 \times 10$	9,86	9,25	9,02	8,98	9,06	9,21
2 500	$6,35 \times 10$	$4,48 \times 10$	$3,26 \times 10$	$2,10 \times 10$	$1,61 \times 10$	$1,37 \times 10$	$1,25 \times 10$	$1,18 \times 10$	$1,15 \times 10$	$1,13 \times 10$	$1,13 \times 10$
3 150	$8,54 \times 10$	$6,62 \times 10$	$4,94 \times 10$	$3,18 \times 10$	$2,39 \times 10$	$1,98 \times 10$	$1,75 \times 10$	$1,61 \times 10$	$1,53 \times 10$	$1,48 \times 10$	$1,45 \times 10$
4 000	$1,09 \times 10^2$	$9,51 \times 10$	$7,41 \times 10$	$4,85 \times 10$	$3,61 \times 10$	$2,94 \times 10$	$2,54 \times 10$	$2,29 \times 10$	$2,13 \times 10$	$2,02 \times 10$	$1,94 \times 10$
5 000	$1,33 \times 10^2$	$1,32 \times 10^2$	$1,09 \times 10^2$	$7,39 \times 10$	$5,51 \times 10$	$4,44 \times 10$	$3,79 \times 10$	$3,36 \times 10$	$3,06 \times 10$	$2,86 \times 10$	$2,71 \times 10$
6 300	$1,56 \times 10^2$	$1,75 \times 10^2$	$1,56 \times 10^2$	$1,12 \times 10^2$	$8,42 \times 10$	$6,78 \times 10$	$5,74 \times 10$	$5,04 \times 10$	$4,54 \times 10$	$4,18 \times 10$	$3,91 \times 10$
8 000	$1,75 \times 10^2$	$2,21 \times 10^2$	$2,15 \times 10^2$	$1,66 \times 10^2$	$1,28 \times 10^2$	$1,04 \times 10^2$	$8,78 \times 10$	$7,66 \times 10$	$6,86 \times 10$	$6,26 \times 10$	$5,81 \times 10$
10 000	$1,93 \times 10^2$	$2,67 \times 10^2$	$2,84 \times 10^2$	$2,42 \times 10^2$	$1,94 \times 10^2$	$1,59 \times 10^2$	$1,35 \times 10^2$	$1,18 \times 10^2$	$1,05 \times 10^2$	$9,53 \times 10$	$8,79 \times 10$

Tabla 23: Valores de $a(f)$ dependiendo de la temperatura y humedad relativa del lugar de medición

En cambio, para la corrección de la absorción del aire, primero tomaremos como referencia la Tabla 23, de donde se escogerán los valores para 20°C y 60%, ya que la sonda marcaba esas cifras para el día de medición, con los siguientes valores para $a(f)$, que se muestran en la Tabla 24:

	$a(f)$ (dB/Km)	$a(f)$ (dB/m)
100Hz	2,52E-01	2,52E-04
125Hz	3,86E-01	3,86E-04
160Hz	5,82E-01	5,82E-04
200Hz	8,58E-01	8,58E-04
250Hz	1,23E+00	1,23E-03
315Hz	1,68E+00	1,68E-03
400Hz	2,21E+00	2,21E-03
500Hz	2,79E+00	2,79E-03
630Hz	3,40E+00	3,40E-03
800Hz	4,05E+00	4,05E-03
1kHz	4,80E+00	4,80E-03
1.25kHz	5,78E+00	5,78E-03

1.6kHz	7,17E+00	7,17E-03
2kHz	9,25E+00	9,25E-03
2.5kHz	1,25E+01	1,25E-02
3.15kHz	1,75E+01	1,75E-02
4kHz	2,54E+01	2,54E-02
5kHz	3,79E+01	3,79E-02
6.3kHz	5,74E+01	5,74E-02
8kHz	8,78E+01	8,78E-02
10kHz	1,35E+02	1,35E-01

Tabla 24: Cálculo de $a(f)$ en dB/m, sacado de la Tabla 16

Sabiendo esto y el valor del radio de la superficie de medición, se obtiene el valor de A_0 , de la Fórmula 19, (Tabla 25):

	A_0 (dB)
100 Hz	2,11E-04
125 Hz	3,24E-04
160 Hz	4,88E-04
200 Hz	7,20E-04
250 Hz	1,03E-03
315 Hz	1,41E-03
400 Hz	1,85E-03
500 Hz	2,34E-03
630 Hz	2,85E-03
800 Hz	3,40E-03
1000 Hz	4,03E-03
1250 Hz	4,85E-03
1600 Hz	6,02E-03
2000 Hz	7,76E-03
2500 Hz	1,05E-02
3150 Hz	1,47E-02
4000 Hz	2,13E-02
5000 Hz	3,18E-02
6300 Hz	4,82E-02
8000 Hz	7,37E-02
10000 Hz	1,13E-01

Tabla 25: Cálculo de A_0 para encontrar el valor de C_3

Así, se puede sacar el cálculo de C_3 , que se muestra en la Tabla 26:

	C_3 (dB)
100 Hz	0,0
125 Hz	0,0
160 Hz	0,0
200 Hz	0,0
250 Hz	0,0
315 Hz	0,0
400 Hz	0,0

500 Hz	0,0
630 Hz	0,0
800 Hz	0,0
1000 Hz	0,0
1250 Hz	0,0
1600 Hz	0,0
2000 Hz	0,0
2500 Hz	0,0
3150 Hz	0,0
4000 Hz	0,0
5000 Hz	0,0
6300 Hz	0,0
8000 Hz	0,1
10000 Hz	0,1

Tabla 26: Cálculo de la corrección para la absorción del aire

Con los valores ya conocidos, en la Tabla 27 se pueden ver los valores del nivel de potencia acústica de la fuente acústica de fachada en la cámara anecoica de la EPSG:

	LW 3745 (dB)
100 Hz	94,7
125 Hz	94,3
160 Hz	94,3
200 Hz	94,1
250 Hz	93,9
315 Hz	96,5
400 Hz	99,5
500 Hz	100,0
630 Hz	98,4
800 Hz	96,0
1000 Hz	95,9
1250 Hz	93,4
1600 Hz	94,9
2000 Hz	95,8
2500 Hz	92,4
3150 Hz	93,5
4000 Hz	95,9
5000 Hz	94,1
6300 Hz	93,2
8000 Hz	92,2
10000 Hz	91,9

Tabla 27: Valores del nivel de potencia acústica en la cámara anecoica de la EPSG

Como en los casos anteriores, también se debe calcular la incertidumbre, y se hace mediante las mismas fórmulas, por eso se deben tener en cuenta la Fórmula 11, que comenta la incertidumbre acústica medida (U), la Fórmula 12, que describe como calcular la desviación típica total (σ_{tot}), la Fórmula 13, para saber los valores de la desviación típica (σ_{omc}) en cada frecuencia, y también la desviación típica reproducida

por el método (σ_{R0}), con ayuda de la Tabla 9. El resultado de todos los cálculos realizados sería la siguiente Tabla 28:

	σ_{omc} (dB)	σ_{R0} (dB)	σ_{tot} (dB)	U (dB)
100 Hz	1,9	0,5	0,9	1,9
125 Hz	2,2	0,5	1,1	2,2
160 Hz	1,9	0,5	1,0	1,9
200 Hz	1,8	0,5	0,9	1,8
250 Hz	1,9	0,5	0,9	1,9
315 Hz	2,6	0,5	1,3	2,6
400 Hz	3,6	0,5	1,8	3,6
500 Hz	4,2	0,5	2,1	4,2
630 Hz	4,8	0,5	2,4	4,8
800 Hz	5,4	0,5	2,7	5,4
1000 Hz	4,6	0,5	2,3	4,6
1250 Hz	5,4	0,5	2,7	5,4
1600 Hz	6,3	0,5	3,2	6,3
2000 Hz	6,6	0,5	3,3	6,6
2500 Hz	8,1	0,5	4,0	8,1
3150 Hz	6,3	0,5	3,1	6,3
4000 Hz	7,0	0,5	3,5	7,0
5000 Hz	7,8	0,5	3,9	7,8
6300 Hz	7,9	0,5	3,9	7,9
8000 Hz	8,8	0,5	4,4	8,8
10000 Hz	8,9	0,5	4,4	8,9

Tabla 28: Cálculo de la incertidumbre de medición acústica, con los valores de desviación típica, en la cámara anecoica de la EPSG

3.4. CAMPO ESENCIALMENTE LIBRE SOBRE UN PLANO REFLECTANTE

En este caso, se va a explicar la medición realizada el 3 de mayo de 2024, en el que se realizaron las medidas en cuanto a la fuente acústica de fachada, ya comentada, mediante la Norma ISO 3744:2010, que se basa en el método de ingeniería para un campo esencialmente libre sobre un plano reflectante. En esta normativa se explica que se basa en:

Esta norma internacional especifica métodos para determinar el nivel de potencia sonora o el nivel de energía sonora de una fuente de ruido a partir de los niveles de presión sonora medidos sobre una superficie que envuelve a la fuente de ruido (maquinaria o equipos) en un entorno que se aproxima a un campo acústicamente libre cerca de uno o más planos reflectantes.

En este caso, el entorno de medición ya no es una cámara acústica, como en los otros tres casos ya explicados, sino que las medidas se realizan al aire libre, siendo más concretos, al exterior del Edificio A de la EPSG.

En la norma, a diferencia de en los otros casos, el rango de frecuencia se especifica que es de 125 Hz a 8 kHz.

Las mediciones en este caso se deben realizar teniendo muy en cuenta las indicaciones de la norma, ya que en ella se especifica que existe un solo modo para realizar estas medidas, que es con la creación de un paralelepípedo, basándose en la altura del altavoz, ya que como se observa en la Imagen 11, la altura de las posiciones de micrófono depende de d , que en la normativa se explica que es la distancia desde la caja de referencia hasta una superficie de medición paralelepipedica. De este modo, sabiendo que dicho valor desde el punto más alto de la caja de referencia hasta la superficie de medición será el valor de la altura del altavoz, el valor de d será de 0,407m, así que se debe tomar este valor como referencia en la siguiente Imagen 11 que sirve como explicación para posicionar el micrófono en las medidas pertinentes:

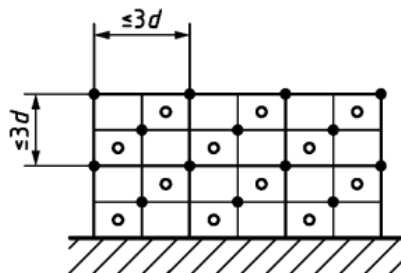


Imagen 11: Posiciones de micrófono clave en una superficie de medición paralelepipedica consistente en áreas parciales rectangulares

De esta, podemos suponer que los puntos negros son posiciones de micrófono clave y los puntos blancos, posiciones de micrófono adicionales cuando se requiere un aumento en el número de micrófonos sobre la totalidad de la superficie de medición. A todo esto, la fuente de medida debe estar en el punto inferior central, claramente.

En la norma se comenta que el número de medidas debe constar de un total de 9 posiciones de micrófono, y que preferiblemente debe existir cierta simetría entre ellas.

Para el caso de esta medición, el esquema de posiciones de medidas será el siguiente, el mostrado en la Imagen 12:

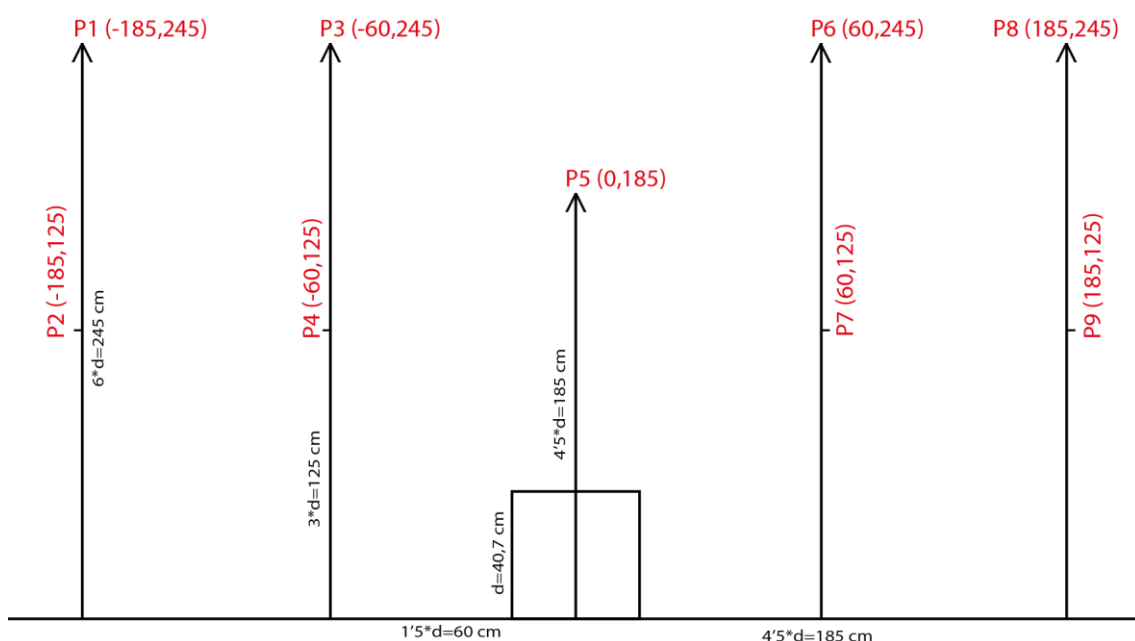


Imagen 12: Esquema de posiciones de micrófono para medidas en exterior

En esta medición también se hizo uso del sonómetro como generador de señal, conectándolo a un amplificador de señal y luego este alimentaba la fuente acústica de fachada para que transmitiera un ruido rosa. En la siguiente Imagen 13 se muestran fotografías del día de la medición, donde se puede observar el entorno de medición y como se llevó a cabo:

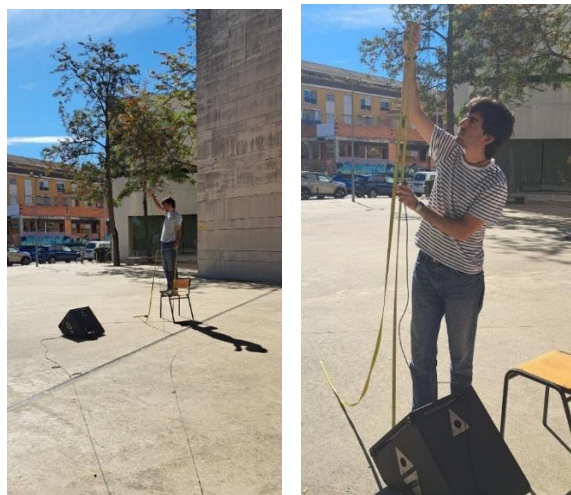


Imagen 13: Fotografía del 3 de mayo de 2024, durante la medición en exterior

Ahora se pueden realizar los cálculos pertinentes a la medición del nivel de potencia acústica, en primer lugar, la corrección de ruido de fondo (K1), ya que como en cada medición, se ha medido ruido de fondo y los niveles de presión con la fuente en funcionamiento, y esta corrección se calcula con la Fórmula 3, y esta está basada en la diferencia entre el ruido emitido por la fuente y el ruido de fondo ($\Delta L_{pi} = L'_{pi(ST)} - L_{pi(B)}$), y se muestra en la siguiente Tabla 29:

	Lp(ST) (dB)	Lp(B) (dB)	ΔL_{pi} (dB)
125 Hz	88,7	49,2	39,5
160 Hz	87,4	49,4	38,1
200 Hz	86,7	45,8	40,9
250 Hz	86,1	48,1	38,0
315 Hz	87,7	44,6	43,1
400 Hz	91,5	42,4	49,1
500 Hz	94,9	45,8	49,1
630 Hz	94,6	42,5	52,1
800 Hz	90,2	41,5	48,7
1000 Hz	92,8	40,5	52,3
1250 Hz	90,2	39,3	51,0
1600 Hz	89,3	38,1	51,2
2000 Hz	91,0	36,6	54,4
2500 Hz	88,8	37,8	51,0
3150 Hz	88,9	40,6	48,4
4000 Hz	92,6	37,9	54,7
5000 Hz	89,6	34,0	55,5
6300 Hz	89,5	28,9	60,6
8000 Hz	89,1	24,9	64,2

Tabla 29: Diferencia entre nivel de presión sonora y ruido de fondo en campo libre

Como en los otros casos, como ningún valor de ΔL_{pi} baja de los 15 dBs, para todas las frecuencias el valor de K_1 será de 0 dB.

En este caso únicamente se tiene en cuenta la corrección medioambiental, al tratarse de estar midiendo al aire libre. Esto se relaciona con la siguiente Fórmula 21:

$$K_2 = 10 * \log \left[1 + 4 * \frac{S}{A} \right] dB$$

Fórmula 21: Corrección medioambiental

Donde:

- **A** es el área de absorción acústica equivalente, en metros cuadrados, del recinto;
- **S** es el área, en metros cuadrados, de la superficie de medición.

Para el cálculo de esta medición necesitamos saber primero que todo cuanto valdrá el área de la superficie de medición (S), que se define con la Fórmula 22:

$$S = 4 * (a * b + b * c + c * a)$$

Fórmula 22: Superficie de medición

Donde:

- **a** = $0,5 * l_2 + 0,5d$
- **b** = $0,5 * l_1 + d$
- **c** = $l_3 + d$

en la que:

- **l1** es la longitud de la caja de referencia desde la pared a la cara frontal (sabemos que es 0'52 m),
- **l2** y **l3** son la anchura y la altura, respectivamente, de la caja de referencia (sabemos que los dos valores son 0'407 m).

De aquí podemos obtener que:

$$a = 0'5 * 0'407 + 0'5 * 0'407 = 0'669$$

$$b = 0'5 * 0'52 + 0'407 = 0'61$$

$$c = 0'407 + 407 = 0'814$$

Por eso, el cálculo del área de la superficie será:

$$S = 4(0'669 * 0'61 + 0'61 * 0'814 + 0'814 * 0'669) = 5,79 m^2$$

Ya sabiendo esto, se puede proceder al cálculo de K_2 , pero observando la fórmula pertinente, y los valores de los cuales depende esta, observamos que el área del recinto (A) es infinito, ya que no hay límite donde calcular dicho valor, por lo que si divides cualquier valor, en este caso S, entre infinito, el resultado es siempre 0, por lo que la fórmula quedaría así:

$$K_2 = 10 * \log[1 + 4 * 0] dB$$

Y esto nos daría el $10 * \log(1)$, que si se calcula nos da un resultado de 0, por lo que el valor de K_2 será también 0 para todas las frecuencias dentro del rango.

El próximo paso sería calcular los niveles de presión sonora promediados en el tiempo en la superficie, que se realiza con la Fórmula 23:

$$\overline{L_p} = \overline{L'_{p(ST)}} - K_1 - K_2$$

Fórmula 23: Niveles de presión sonora promediados en el tiempo para campo libre

Sabiendo los valores de las correcciones de ruido de fondo y el ruido medioambiental, se podría suponer que el valor de $\overline{L_p}$ sería el mismo que el que se obtiene directamente de hacer el promedio de valores obtenidos por el sonómetro, que son los que se muestran en la Tabla 30:

	$\overline{L_p}$ (dB)
125 Hz	90,0
160 Hz	88,7
200 Hz	87,4
250 Hz	86,7
315 Hz	86,1
400 Hz	87,7
500 Hz	91,5
630 Hz	94,9
800 Hz	94,6
1000 Hz	90,2
1250 Hz	92,8
1600 Hz	90,2
2000 Hz	89,3
2500 Hz	91,0
3150 Hz	88,8
4000 Hz	88,9
5000 Hz	92,6
6300 Hz	89,6
8000 Hz	89,5

Tabla 30: Nivel de presión acústica promediado en el tiempo para espacio libre

La siguiente fase sería el cálculo del nivel de potencia acústica, con la Fórmula 24:

$$L_W = \overline{L_p} + 10 * \log\left(\frac{S}{S_0}\right) dB$$

Fórmula 24: Nivel de potencia acústica para campo libre

Donde:

- **S** es el área, en metros cuadrados, de la superficie de medición;
- **S₀** = 1 m².

Para el cálculo de S, se usa el mismo que se ha obtenido para la Fórmula 22, y con esto se obtienen los valores de L_w, como se muestran en la Tabla 31:

	LW 3744 (dB)
125 Hz	96,4
160 Hz	95,1
200 Hz	94,3
250 Hz	93,7
315 Hz	95,3
400 Hz	99,1
500 Hz	102,5
630 Hz	102,2
800 Hz	97,8
1000 Hz	100,4
1250 Hz	97,9
1600 Hz	96,9
2000 Hz	98,6
2500 Hz	96,5
3150 Hz	96,6
4000 Hz	100,2
5000 Hz	97,2
6300 Hz	97,1
8000 Hz	96,8

Tabla 31: Valores del nivel de potencia acústica en espacio libre

Como en los casos anteriores, también se debe calcular la incertidumbre, y se hace mediante las mismas fórmulas, por eso se deben tener en cuenta la Fórmula 11, que comenta la incertidumbre acústica medida (U), la Fórmula 12, que describe como calcular la desviación típica total (σ_{tot}), la Fórmula 13, para saber los valores de la desviación típica (σ_{omc}) en cada frecuencia, y también la desviación típica reproducida por el método (σ_{R0}), con ayuda de la Tabla 9. El resultado de todos los cálculos realizados sería la siguiente Tabla 32:

	σ_{omc} (dB)	σ_{R0} (dB)	σ_{tot} (dB)	U (dB)
125 Hz	4,4	0,5	4,4	8,8
160 Hz	4,9	0,5	5,0	9,9
200 Hz	4,8	0,5	4,8	9,7
250 Hz	5,5	0,5	5,5	11,1
315 Hz	5,5	0,5	5,5	11,1
400 Hz	5,8	0,5	5,8	11,6
500 Hz	6,6	0,5	6,6	13,2
630 Hz	5,3	0,5	5,3	10,6
800 Hz	3,8	0,5	3,8	7,7
1000 Hz	4,5	0,5	4,6	9,1
1250 Hz	5,6	0,5	5,6	11,2
1600 Hz	6,3	0,5	6,3	12,6
2000 Hz	4,8	0,5	4,8	9,7
2500 Hz	4,7	0,5	4,8	9,5
3150 Hz	5,1	0,5	5,1	10,2
4000 Hz	5,1	0,5	5,1	10,2
5000 Hz	4,6	0,5	4,7	9,3
6300 Hz	5,3	0,5	5,3	10,7
8000 Hz	8,0	0,5	8,0	15,9

Tabla 32: Cálculo de la incertidumbre de medición acústica, con los valores de desviación típica, al aire libre

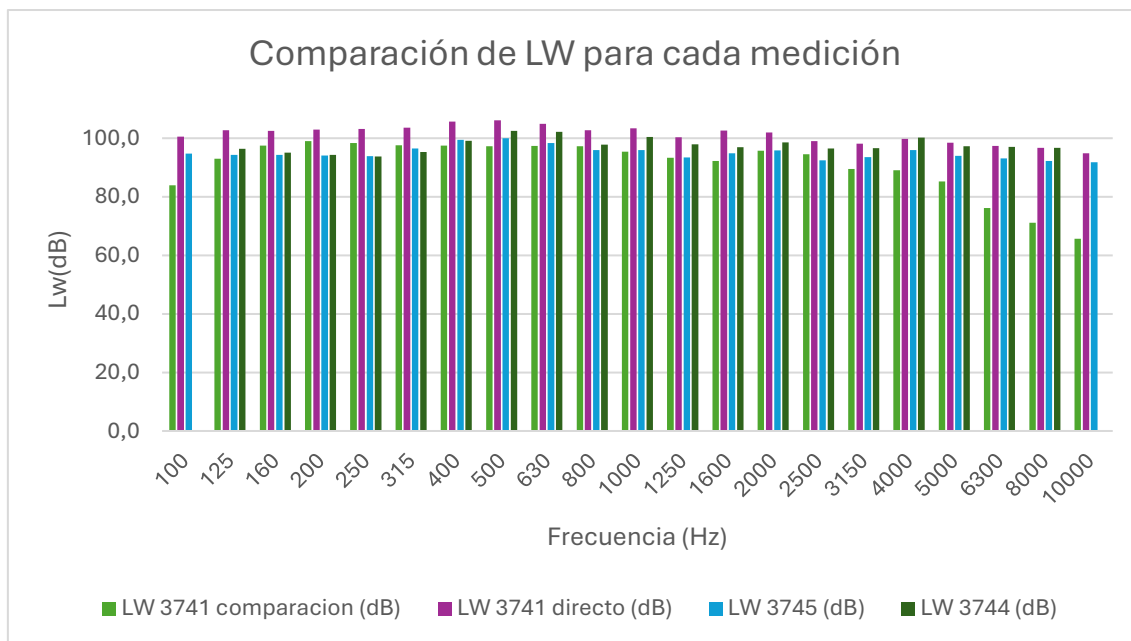
4. COMPARATIVA

Ya realizadas todas las mediciones mostradas en el apartado anterior, ahora se procede a realizar una comparación entre los resultados obtenidos en cuanto al nivel de potencia acústica para cada tipo de medición. En la siguiente Tabla 33 se muestran en conjunto todas estas mediciones:

	LW 3741:2011 directo (dB)	LW 3741:2011 comparación (dB)	LW 3745:2012 (dB)	LW 3744:2011 (dB)
100 Hz	84,0	100,6	94,7	-
125 Hz	93,0	102,7	94,3	96,4
160 Hz	97,5	102,5	94,3	95,1
200 Hz	99,0	103,0	94,1	94,3
250 Hz	98,3	103,1	93,9	93,7
315 Hz	97,5	103,6	96,5	95,3
400 Hz	97,5	105,7	99,5	99,1
500 Hz	97,2	106,1	100	102,5
630 Hz	97,4	104,9	98,4	102,2
800 Hz	97,3	102,8	95,9	97,8
1000 Hz	95,4	103,3	95,9	100,4
1250 Hz	93,3	100,4	93,4	97,9
1600 Hz	92,3	102,6	94,9	96,9
2000 Hz	95,7	102,0	95,8	98,6
2500 Hz	94,5	99,0	92,4	96,5
3150 Hz	89,5	98,2	93,5	96,6
4000 Hz	89,1	99,8	95,9	100,2
5000 Hz	85,2	98,5	94	97,2
6300 Hz	76,1	97,3	93,1	97,1
8000 Hz	71,1	96,7	92,2	96,8
10000 Hz	65,7	94,8	91,8	-

Tabla 33: Valores de nivel de potencia para las mediciones realizadas

De este modo, se obtiene la siguiente Gráfica 1, en la que se comparan los valores obtenidos:



Gráfica 1: Comparación de nivel de potencia acústica obtenido en cada medición

Lo mismo pasa con la incertidumbre, que dependiendo de la medición y el entorno se vuelve más grande o pequeño, como se muestra en la Tabla 34:

	U 3741 directo (dB)	U 3741 comparación (dB)	U 3745 (dB)	U 3744 (dB)
100 Hz	6,5	10,2	1,9	-
125 Hz	7,6	10,8	2,2	8,8
160 Hz	7,1	8,8	1,9	9,9
200 Hz	5,6	8,8	1,8	9,7
250 Hz	4,5	10	1,9	11,1
315 Hz	3,5	5,7	2,6	11,1
400 Hz	7,2	5,2	3,6	11,6
500 Hz	3,1	4,9	4,2	13,2
630 Hz	2,6	3,5	4,8	10,6
800 Hz	1,7	2,7	5,4	7,7
1000 Hz	1,6	2	4,6	9,1
1250 Hz	1,5	1,4	5,4	11,2
1600 Hz	1,4	1,5	6,3	12,6
2000 Hz	1,5	1,3	6,6	9,7
2500 Hz	1,4	1,4	8,1	9,5
3150 Hz	1,3	1,3	6,3	10,2
4000 Hz	2	1,3	7	10,2
5000 Hz	1,8	2,3	7,8	9,3
6300 Hz	2,2	2,8	7,9	10,7
8000 Hz	3,9	4,1	8,8	15,9
10000 Hz	4	5,5	8,9	-

Tabla 34: Valores de incertidumbre para cada medición realizada

Para cada una de las mediciones existe un rango de valores, que viene dado por la incertidumbre que se causa en cada medida. Los valores para cada valor de los niveles de potencia acústica se explican en el Anexo B.

Como podemos observar en las tablas de dicho Anexo B, como el valor de la incertidumbre es más grande para las medidas realizadas en campo esencialmente libre sobre plano reflectante, el rango de nivel de potencia acústica es mucho mayor en este caso, en todas las frecuencias, en comparación con todos los otros métodos. Esto se puede observar de una forma más visual en las gráficas que se encuentran en el Anexo C, donde se muestra de forma gráfica para cada frecuencia, cual es el rango de LW para cada método:

De este modo, se puede observar lo ya comentado, que las mediciones realizadas con la Norma ISO 3744 en campo libre muestran un rango de valores mucho más grande que con los otros métodos. También se observa que en las bajas frecuencias la incertidumbre es menor, menos en el caso de método directo y plano reflectante, por lo que los valores obtenidos para cada medición tendrán menor diferencia en cuanto al LW que en las altas frecuencias, hecho que se hace más notable en las mediciones con el método de comparación de la Norma ISO 3741, que en frecuencias altas se desvirtúa y se aleja de las otras mediciones, y esto se debe a que las medidas se realizaron con una fuente acústica diferente a las demás, la fuente de referencia Brüel&Kjaer 4224.

Otro de los motivos que pueden causar dicha desviación podría ser el grado de precisión que existe en cada Norma ISO que se usa en este estudio, por eso se procede a exponer cada uno de estos grados:

- Norma ISO 3741:2011 : esta norma internacional describe métodos de precisión de grado 1 (grado de precisión), según se define en la Norma ISO 12001.
- Norma ISO 3744:2011 : esta norma internacional describe métodos de precisión de grado 2 (grado de ingeniería), según se define en la Norma ISO 12001.
- Norma ISO 3745:2012 : Los métodos indican un grado de precisión (grado 1), según se define en la Norma ISO 12001.

Es por eso que el valor de la incertidumbre y la diferencia entre el rango entre las mediciones realizadas en campo libre se diferencian tanto de las otras mediciones realizadas, ya que estas tienen un grado 1 de precisión, y la otra medición se ha realizado bajo un grado 2 de precisión.

5. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo expuesto en esta memoria, se repasan todos los procesos que han sido necesarios para llevar a cabo el Trabajo de Fin de Grado, el cual se basa en la evaluación de diferentes procedimientos para la medida de la potencia acústica de una fuente acústica de fachada, para el Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sistemas e Imagen, en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), en el Campus de Gandía, conocido como la Escuela Politécnica Superior de Gandía (EPSG).

Para la realización de este proyecto, se ha necesitado estudiar detalladamente los procedimientos que se explican en diferentes Normas ISO. Entre ellas, destacan la 3741:2011, en la que se habla sobre el método de laboratorio (directo y de comparación) para cámaras reverberantes, también la 3745:2012, en la que se explica el método de

laboratorio para cámaras anecoicas, y la 3744:2011, que habla sobre como realizar mediciones en campo libre (al exterior), con un plano reflectante. Al estar algunas de estas basadas en otras Normas ISO, se han debido consultar otras para así poder asegurarse de que el procedimiento estaba siendo el correcto.

Para cada tipo de medición, cuatro en total, se han llevado a cabo los procedimientos normativos en cada caso. La metodología seguida, ha sido la misma en los cuatro casos: En primer lugar, siempre se realizaba un repaso de las normativas ya estudiadas, para asegurarse del proceso de medición que se iba a llevar a cabo, y entender conceptos como los planos de posiciones de micrófono, el rango de frecuencias necesario para cada caso, el número de posiciones de micrófono, o también las condiciones a cumplir para saber si es necesario, o no, repetir las medidas. La segunda fase sería realizar las medidas pertinentes para cada tipo de entorno. Más tarde, los valores de las mediciones deben ser pasadas del sonómetro usado, a la computadora con ayuda del software diseñado por Brüel&Kjaer. Ya volcados los resultados, se deben realizar en primer lugar ciertos cálculos para saber si las medidas tomadas son las necesarias o si nos debemos exceder y hacer más. Esto podría realizarse con cálculos de incertidumbre (SM), o basándose en los valores máximos en cuanto al ruido de fondo medido, que no deben superar los valores de referencia dichos por la normativa. Ya en este punto, se deben realizar los cálculos que se explican en cada Norma ISO para sacar el nivel de potencia acústica, pero en la mayoría, el procedimiento es comprobar la diferencia del promedio de los valores de presión acústica con la fuente en funcionamiento o no, para así calcular la corrección de ruido de fondo, y luego con esto calcular el nivel de presión acústica, que ayudará al cálculo final de cada medición. Por último, se realiza un estudio de la incertidumbre de los resultados obtenidos, para saber cuánto fluctúan los resultados, y la dispersión asociada a cada valor de potencia acústica en cada banco de tercio de octava.

Todo este procedimiento explicado está realizado en el tercer apartado de esta memoria.

Y ya como conclusión, para conocer las diferencias, si existen, de cada uno de los cuatro métodos utilizados, se debe realizar una comparación de los resultados obtenidos, como se hace en el cuarto punto de este TFG, y en este se pueden observar las diferentes gráficas en las que se basa la incertidumbre de los valores de cada nivel acústico para cada frecuencia, y así para cada una se obtiene un rango para cada medición.

Así, se puede observar que:

En las gráficas en las que se muestran los valores obtenidos en las mediciones para las bajas y medias frecuencias (de 125 Hz hasta 3150 Hz), (ver Anexo C) se puede observar el hecho de que el rango que acoge los resultados obtenidos en las medidas relacionadas con la Norma ISO 3744:2011, (campo libre sobre plano reflectante), es mucho más amplio que el resto. Esto se debe a que el valor de incertidumbre que se muestra en la Tabla 34, para esta normativa es mayor que en el resto de caso (también se puede comprobar en la Tabla B.4, del Anexo B).

El hecho que la incertidumbre asociada al procedimiento de medición basado en “campo libre sobre plano reflectante” sea mayor que en el resto de métodos es coherente, y es que, la ISO 3744:2011 presenta procedimientos de grado de precisión 2, mientras que el resto de normativas que se han trabajado en este TFG, son de grado de precisión 1. El grado de precisión es mayor, cuanto menor es el número que lo identifica: grado de precisión 3 es menor que un grado de precisión 1. Siguiendo con la relación de la precisión en los distintos procedimientos: el método descrito en la ISO 3744:2011 se

conoce como “método de ingeniería”, mientras que el resto de métodos visto en este TFG se conocer como “métodos de laboratorio”. Sin embargo, es imprescindible conocer y poder aplicar los procedimientos descritos en la ISO 3744:2011, ya que, son muchas las fuentes de ruido, sobre toodo en el ámbito industrial, que por su tamaño y emplazamiento, no es posible desplazarlas a cámaras reverberantes o anecoicas.

Cabe destacar que, para los tercios de octava de las frecuencias 6300Hz, 8000Hz y 10000Hz, los valores de las mediciones en la cámara reverberante, que se hicieron tomando como referencia la Norma ISO 3741:2011: método de comparación, descuadran y disminuyen bruscamente. Los motivos pueden ser diferentes: estas frecuencias quedan fuera de los estándares de acústica de la edificación, y las dos fuentes utilizadas (la de referencia y la fuente problema) son fuentes diseñadas para acústica de la edificación, o puede que, ya se esté introduciendo una incertidumbre en el cálculo de la potencia de referencia, que puede arrastrarse durante todo el proceso, y afecte más a estas elevadas frecuencias. Queda de esta forma, un trabajo abierto, con posibilidades de trabajos futuros relacionados.

Este proyecto me ha ayudado a materializar estas mediciones y darle forma a la dificultad de procedimiento de cada una. Con el TFG he aprendido que no todo está en la teoría, sino que el mundo real de la acústica se encuentra sobre todo en la práctica y en intentar descifrar todo lo que en una misma frase quieren decir los creadores de la Norma ISO que se use de referencia.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bernard, T. M. (1977). *Acoustics of Buildings*. Applied Science Publishers.
- Egan, M. D. (2007). *Architectural Acoustics*. J. Ross Publishing.
- GlobalSuite Solutions. (28 de septiembre de 2023). *¿Qué son las normas ISO?* (<https://www.globalsuitesolutions.com/es/que-son-normas-iso/>)
- González, L. (2016, 15 de abril). *Proceso de elaboración de normas ISO - Bibliopos: Biblioteca de recursos para Bibliotecarios y Opositores*. Bibliopos: Biblioteca de recursos para Bibliotecarios y Opositores. <https://www.bibliopos.es/proceso-elaboracion-normas-iso/>
- Harris, Cyril M. (1995). *Manual de Medidas Acústicas y Control del Ruido*. McGraw-Hill.
- International Organization for Standardization. (2016). EN ISO 16283-3:2016 Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Façade sound insulation. ISO.
- Lord, P., & Templeton, D. (1986). *Sound and Buildings*. Elsevier Applied Science.
- Organización Internacional de Normalización. (s.f). *Que es lo que hacemos*. <https://www.iso.org/es/home/about-iso/what-we-do.html>
- Scheuren, J. (1998). *Measurement of facade sound insulation using a sound source*. Applied Acoustics, 53(1-3), 87-92.
- UNE-ISO 16283-3:2016 Acústica. *Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 3: Aislamiento a ruido de fachada*. (2016). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0057030>
- UNE-ISO 3741:2011 Acústica. *Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio en cámaras reverberantes*. (2011). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0047768>
- UNE-ISO 3744:2011 Acústica. *Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de fuentes de ruido utilizando presión acústica. Métodos de ingeniería para un campo esencialmente libre sobre un plano reflectante*. (2011). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0047781>
- UNE-ISO 3745:2012 Acústica. *Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio para cámaras anecoicas y semi-anecoicas*. (2012). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0050031>
- UNE-ISO 3746:2011 Acústica. *Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Método de control utilizando una superficie de medición envolvente sobre un plano reflectante*. (2011). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/norma/?c=N0048061>
- UNE-ISO 6926:2016 Acústica. *Requisitos de funcionamiento y calibración de fuentes acústicas de referencia empleadas para la determinación de los niveles de potencia*

acústica. (2016). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0056976>

UNE-ISO 9613-1:1993 Acústica. Atenuación del sonido durante la propagación al aire libre. Parte 1: Cálculo de la absorción del sonido por la atmósfera. (1993). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/iso/?c=017426>

Unifikas. (6 de febrero de 2023). ¿Qué son las Normas ISO? <https://www.unifikas.com/es/noticias/que-son-las-normas-iso>

7. ANEXOS

ANEXO A: CÁLCULO DE NIVEL DE POTENCIA DE LA FUENTE DE REFERENCIA PARA EL MÉTODO DE COMPARACIÓN DE LA NORMA ISO 3741:2011

Para realizar las mediciones bajo las indicaciones de este método de comparación, se deben seguir las siguientes aclaraciones:

- Medición en 6 posiciones (como mínimo) de micrófono, a 1,5m del altavoz y a una distancia de 1,5m entre cada posición.
- Si es preciso, en caso de que los cálculos no concuerden con la normativa utilizada, se deben realizar más medidas en diferentes posiciones.
- Medir ruido de fondo para cada posición efectuada, sin la fuente acústica de fachada en funcionamiento.

Después de realizarse las mediciones se deben pasar los datos del sonómetro a una computadora mediante el software creado por Brüel&Kjaer, para resolver dudas sobre si hacen falta más mediciones a parte de la 6 realizadas inicialmente.

Pues bien, para salir de dudas se debe volver a calcular el valor de desviación típica (SM) para cada frecuencia dentro del rango de frecuencias especificado. Los resultados de estos cálculos se visualizan en la Tabla A.1:

	SM
100 Hz	1,7
125 Hz	1,0
160 Hz	0,9
200 Hz	1,2
250 Hz	1,0
315 Hz	0,4
400 Hz	0,5
500 Hz	0,3
630 Hz	0,4
800 Hz	0,2
1000 Hz	0,5
1250 Hz	0,6
1600 Hz	0,5
2000 Hz	0,6
2500 Hz	0,5
3150 Hz	0,5
4000 Hz	0,9
5000 Hz	0,8
6300 Hz	1,0
8000 Hz	1,9
10000 Hz	1,9

Tabla A.1: Cálculo de SM para 6 posiciones de micrófono en cámara reverberante con método de comparación

En este caso se superan los 1'5 en diferentes rangos de frecuencia, cosa que prohíbe la norma, pero al no tratarse de un exceso de desviación, como el valor de SM no supera los 1'5 en la mayoría de los casos, 6 serán el máximo de posiciones de micrófono.

Al tratarse de una fuente de referencia, el primer paso a realizar será calcular el nivel medio de presión acústica corregido promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava del ruido de fondo de esta fuente en la cámara de ensayo, con ayuda de la Fórmula A.1:

$$\overline{L_{p(RSS)}} = 10 * \log \left[\frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} 10^{0,1 * L_{pi(RSS)}} \right] dB$$

Fórmula A.1: nivel medio de presión acústico corregido promediado

Donde:

- $L_{pi(RSS)} = L'_{pi(RSS)} - K1_{(RSS)}$, en el que
 - $L'_{pi(RSS)}$ es el nivel de presión acústica medido (no corregido) promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava de la fuente acústica de referencia, en la iésima posición de micrófono o para la iésima trayectoria de micrófono, en decibelios;
 - $K1i(RSS)$ es la corrección del ruido de fondo para la fuente acústica de referencia en la iésima posición de micrófono o para la iésima trayectoria de micrófono, en decibelios, y se calcula con la fórmula 15:

$$K1(RSS) = -10 * \log(1 - 10^{0,1 * \Delta L_{pi(RSS)}}) dB$$

Fórmula A.2: corrección de ruido de fondo para la fuente acústica de referencia

Donde:

- $\Delta L_{pi(RSS)} = L'_{pi(RSS)} - L_{pi(B)}$, en la que:
 - **$L'_{pi(RSS)}$** es el nivel de presión acústica medido (no corregido) promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava, en la iésima posición de micrófono o para la iésima trayectoria de micrófono, con la fuente de ruido de referencia, en decibelios;
 - **$L_{pi(B)}$** es el nivel de presión acústica promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava del ruido de fondo (B), medido en la iésima posición de micrófono o para la iésima trayectoria de micrófono, en decibelios.
- NM es el número de posiciones de micrófono o trayectorias de micrófono individuales.

Entonces lo primero sería calcular $K1(RSS)$, que con lo explicado, para empezar se calcula la diferencia entre el valor de las mediciones cuando al fuente de referencia está en funcionamiento y el ruido de fondo del recinto ($\Delta L_{pi(RSS)}$), y esto lo observamos en la Tabla A.2:

	$L_p(RSS)(ST)$ (dB)	$L_p(RSS)(B)$ (dB)	$\Delta L_{pi(RSS)}$ (dB)
100 Hz	83,6	24,9	58,7
125 Hz	91,2	19,7	71,5
160 Hz	95,3	15,2	80,1
200 Hz	97,1	11,6	85,5

250 Hz	96,8	10,5	86,3
315 Hz	96,3	7,1	89,2
400 Hz	96,4	6,8	89,6
500 Hz	96,2	3,1	93,1
630 Hz	96,5	1,4	95,1
800 Hz	96,2	1,1	95,1
1000 Hz	94,2	1,0	93,2
1250 Hz	91,9	1,2	90,6
1600 Hz	90,4	1,7	88,7
2000 Hz	93,2	2,2	91,0
2500 Hz	91,3	2,9	88,3
3150 Hz	85,5	3,7	81,8
4000 Hz	84,0	4,5	79,5
5000 Hz	78,9	5,4	73,5
6300 Hz	68,4	6,3	62,1
8000 Hz	62,2	7,3	54,9
10000 Hz	55,4	8,2	47,3

Tabla A.2: Diferencia entre nivel de presión sonora y ruido de fondo en la cámara reverberante con el método de comparación

Como en la normativa se comenta que en el caso de que ninguno de los valores de $\Delta L_{pi(RSS)}$ baje de los 15 dB, el resultado de $K1(RSS)$ para todas las frecuencias será de 0 dB. Entonces, para calcular el valor de $L_{pi(RSS)}$, tendremos que es lo mismo que $L'_{pi(RSS)}$, por lo que se puede suponer que en este caso, al no haber corrección, el valor de $\overline{L}_{p(RSS)}$ será el mismo que el de $L'_{pi(RSS)}$. El resultado de estos cálculos se muestra en la siguiente Tabla A.3:

	Lp(RSS) (dB)
100 Hz	83,6
125 Hz	91,2
160 Hz	95,3
200 Hz	97,1
250 Hz	96,8
315 Hz	96,3
400 Hz	96,4
500 Hz	96,2
630 Hz	96,5
800 Hz	96,2
1000 Hz	94,2
1250 Hz	91,9
1600 Hz	90,4
2000 Hz	93,2
2500 Hz	91,3
3150 Hz	85,5
4000 Hz	84,0
5000 Hz	78,9
6300 Hz	68,4
8000 Hz	62,2

10000 Hz	55,4
----------	------

Tabla A.3: Nivel medio de presión acústica corregido promediado para la fuente de referencia

De este modo, sabemos que los valores para el cálculo de LW(RSS) será con ayuda de la siguiente Fórmula A.3:

$$L_W = \overline{L_{p(ST)}} + \left\{ 10 * \log\left(\frac{A}{A_0}\right) dB + 4,34 * \frac{A}{S} dB + 10 * \log\left(1 + \frac{S * c}{8 * V * f}\right) dB + C_1 + C_2 - 6dB \right\}$$

Fórmula A.3: Nivel de potencia acústica de una cámara reverberante

Donde:

- **Lp(ST)** es el nivel de presión acústica medio corregido promediado en el tiempo de la banda de tercio de octava en la cámara de ensayo con la fuente de ruido sometida a ensayo en funcionamiento, en decibelios;
- **A** es el área de absorción equivalente, en metros cuadrados, de la cámara, se calcula con la Fórmula A.4:

$$A = \frac{55,26}{c} * \left(\frac{V}{TR}\right) m^2$$

Fórmula A.4: Área de absorción de una cámara reverberante

- En el que **TR** es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara de ensayo reverberante en la frecuencia central de banda de la(s) medición(es);
- **A0** = 1 m²;
- **S** es el área total de la superficie, en metros cuadrados, de la cámara de ensayo reverberante;
- **c** es la velocidad, en metros por segundo, del sonido a la temperatura, θ , en grados centígrados, del aire en la cámara de ensayo reverberante en el momento del ensayo, que se calcula con la Fórmula A.5:

$$c = 20,05 * \sqrt{273 + \theta} \text{ m/s}$$

Fórmula A.5: Velocidad del sonido

- **V** es el volumen, en metros cúbicos, de la cámara de ensayo reverberante;
- **f** es la frecuencia central de la banda, en hercios, de la(s) medición(es);
- **C1** es la corrección de la magnitud de referencia, en decibelios, para tener en cuenta las diferentes magnitudes de referencia utilizadas para calcular el nivel de presión acústica en decibelios y el nivel de potencia acústica en decibelios, y es una función de la impedancia característica del aire en las condiciones meteorológicas en el momento y lugar de las mediciones, se muestra en la Fórmula A.6 como se calcula:

$$C_1 = -10 * \log\left(\frac{p_s}{p_{s,0}}\right) dB + 5 * \log\left(\frac{273,5 + \theta}{\theta_0}\right) dB$$

Fórmula A.6: Corrección de la magnitud de referencia

- **C2** es la corrección de la impedancia de radiación, en decibelios, para cambiar la potencia acústica real existente en las condiciones meteorológicas en el momento y lugar de la medición a la potencia acústica en condiciones meteorológicas de referencia; el valor se debe obtener a partir del código de ensayo de ruido adecuado, pero en ausencia de un código de ensayo de ruido,

la siguiente ecuación es válida para una fuente monopolar, y es un valor medio para otras fuentes, se muestra en la Fórmula A.7 como se calcula:

$$C_2 = -10 * \log\left(\frac{p_s}{p_{s,0}}\right) dB + 15 * \log\left(\frac{273,5 + \theta}{\theta_1}\right) dB$$

Fórmula A.7: Corrección de impedancia de radiación

En la cual:

- **ps** es la presión estática, en kilopascales, en la cámara de ensayo en el momento del ensayo,
- **ps,0** es la presión estática de referencia, 101,325 kPa,
- **θ** es la temperatura del aire, en grados centígrados, en la cámara de ensayo en el momento del ensayo,
- **θ0** = 314 K,
- **θ1** = 296 K.

A continuación, se muestran en la Tabla A.4 los valores de los factores de los que dependen los cálculos a realizar:

Ao	1 m ²
Superficie de la cámara	236 m ²
Volumen de la cámara	238 m ³
Temperatura	18,8 °C
Presión atmosférica	100,845 KPa
Po,s	101,325 KPa
Velocidad de sonido	342,5 m/s
θo	314,0 K
θ1	296,0 K

Tabla A.4: Valores para el cálculo del nivel de potencia acústica en la cámara reverberante de la EPSG

Se sabe que en este caso, se calcula C1, con un valor de -0'1, y también C2, con un valor de -0'1. De este modo, se muestra en la Tabla A.5 los valores obtenidos para el nivel de potencia acústica para la fuente de referencia:

	LW(RSS) (dB)
100 Hz	84,0
125 Hz	93,0
160 Hz	97,5
200 Hz	99,0
250 Hz	98,3
315 Hz	97,5
400 Hz	97,5
500 Hz	97,2
630 Hz	97,4
800 Hz	97,3
1000 Hz	95,4
1250 Hz	93,3
1600 Hz	92,3
2000 Hz	95,7
2500 Hz	94,5

3150 Hz	89,5
4000 Hz	89,1
5000 Hz	85,2
6300 Hz	76,1
8000 Hz	71,1
10000 Hz	65,7

Tabla A.5: Valores de nivel de potencia acústica para la fuente de referencia

ANEXO B: RANGO DE VALORES POSIBLES EN CUANTO AL NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA DEPENDIENDO DEL TIPO DE MEDICIÓN

Conociendo los datos obtenidos en la Tabla 37 y Tabla 38, se pueden conocer los valores que admite cada frecuencia en cada tipo de medición, es decir, por ejemplo, si para la frecuencia de 2 KHz, el valor obtenido en cuanto al nivel de potencia acústica (LW), es de 70 dB, pero hay una incertidumbre de medición (U) de 2 dB, el rango en cuanto al valor aceptado para el tipo de medición en el que se haya hecho va de 68 dB a 72 dB, es decir: 70 ± 2 dB.

Este tipo de rangos, en cuanto a las mediciones realizadas en la cámara reverberante, con ayuda de la Norma ISO 3741, con el método directo, se muestra en la Tabla B.1:

	LW 3741 directo (dB) (-)	LW 3741 directo (dB) (+)
100 Hz	90,4	110,8
125 Hz	91,9	113,5
160 Hz	93,7	111,3
200 Hz	94,2	111,8
250 Hz	93,1	113,1
315 Hz	97,9	109,3
400 Hz	100,5	110,9
500 Hz	101,2	111,0
630 Hz	101,4	108,4
800 Hz	100,1	105,5
1000 Hz	101,3	105,3
1250 Hz	99,0	101,8
1600 Hz	101,1	104,1
2000 Hz	100,7	103,3
2500 Hz	97,6	100,4
3150 Hz	96,9	99,5
4000 Hz	98,5	101,1
5000 Hz	96,2	100,8
6300 Hz	94,5	100,1
8000 Hz	92,6	100,8
10000 Hz	89,3	100,3

Tabla B.1: Rango de valores posibles en cuanto a la LW y la U en mediciones en cámara reverberante por método directo

Para el mismo caso, pero con el método de comparación quedaría como en la Tabla B.2:

	LW 3741 comparación (dB) (-)	LW 3741 comparación (dB) (+)
100 Hz	77,5	90,5
125 Hz	85,4	100,6
160 Hz	90,4	104,6
200 Hz	93,4	104,6
250 Hz	93,8	102,8
315 Hz	94,0	101,0
400 Hz	90,3	104,7

500 Hz	94,1	100,3
630 Hz	94,8	100,0
800 Hz	95,6	99,0
1000 Hz	93,8	97,0
1250 Hz	91,8	94,8
1600 Hz	90,9	93,7
2000 Hz	94,2	97,2
2500 Hz	93,1	95,9
3150 Hz	88,2	90,8
4000 Hz	87,1	91,1
5000 Hz	83,4	87,0
6300 Hz	73,9	78,3
8000 Hz	67,2	75,0
10000 Hz	61,7	69,7

Tabla B.2: Rango de valores posibles en cuanto a la LW y la U en mediciones en cámara reverberante por método de comparación

También pasa lo mismo con las mediciones realizadas en la cámara anecoica de la EPSG, tomando como referencia la Norma ISO 3745, y estos valores se muestran en la siguiente Tabla B.3:

	LW 3745 (dB) (-)	LW 374 (dB) (+)
100 Hz	92,8	96,6
125 Hz	92,1	96,5
160 Hz	92,4	96,2
200 Hz	92,3	95,9
250 Hz	92	95,8
315 Hz	93,9	99,1
400 Hz	95,9	103,1
500 Hz	95,8	104,2
630 Hz	93,6	103,2
800 Hz	90,5	101,3
1000 Hz	91,3	100,5
1250 Hz	88	98,8
1600 Hz	88,6	101,2
2000 Hz	89,2	102,4
2500 Hz	84,3	100,5
3150 Hz	87,2	99,8
4000 Hz	88,9	102,9
5000 Hz	86,2	101,8
6300 Hz	85,2	101
8000 Hz	83,4	101
10000 Hz	82,9	100,7

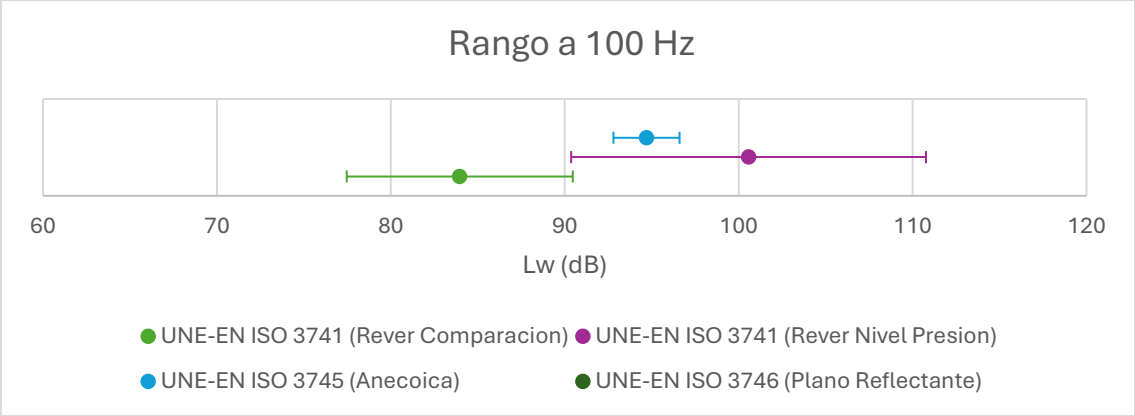
Tabla B.3: Rango de valores posibles en cuanto a la LW y la U en mediciones en cámara anecoica

Por último, se muestra en la Tabla B.4 dicho rango de valores de LW para las mediciones realizadas en campo libre con ayuda de la Norma ISO 3744:

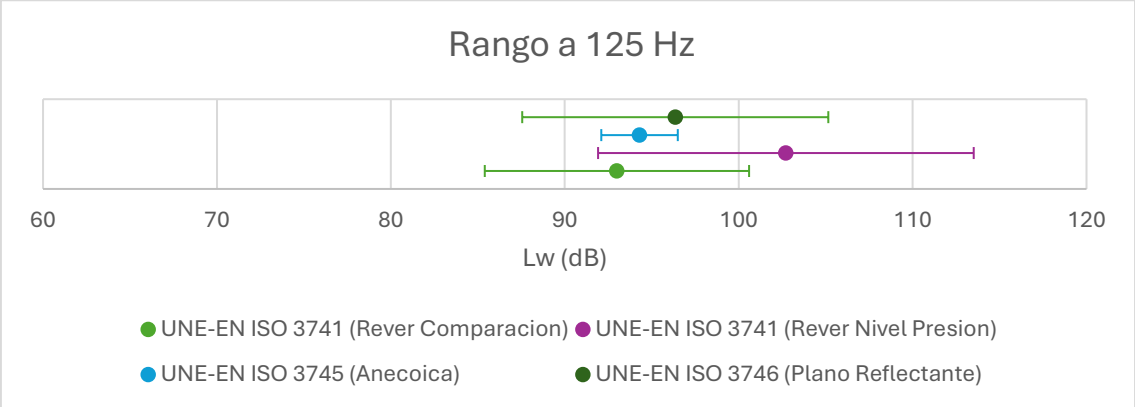
	LW 3745 (dB) (-)	LW 374 (dB) (+)
125 Hz	87,6	105,2
160 Hz	85,2	105,0
200 Hz	84,6	104,0
250 Hz	82,6	104,8
315 Hz	84,2	106,4
400 Hz	87,5	110,7
500 Hz	89,3	115,7
630 Hz	91,6	112,8
800 Hz	90,1	105,5
1000 Hz	91,3	109,5
1250 Hz	86,7	109,1
1600 Hz	84,3	109,5
2000 Hz	88,9	108,3
2500 Hz	87,0	106,0
3150 Hz	86,4	106,8
4000 Hz	90,0	110,4
5000 Hz	87,9	106,5
6300 Hz	86,4	107,8
8000 Hz	80,9	112,7

Tabla B.4: Rango de valores posibles en cuanto a la LW y la U en mediciones en plano reflectante

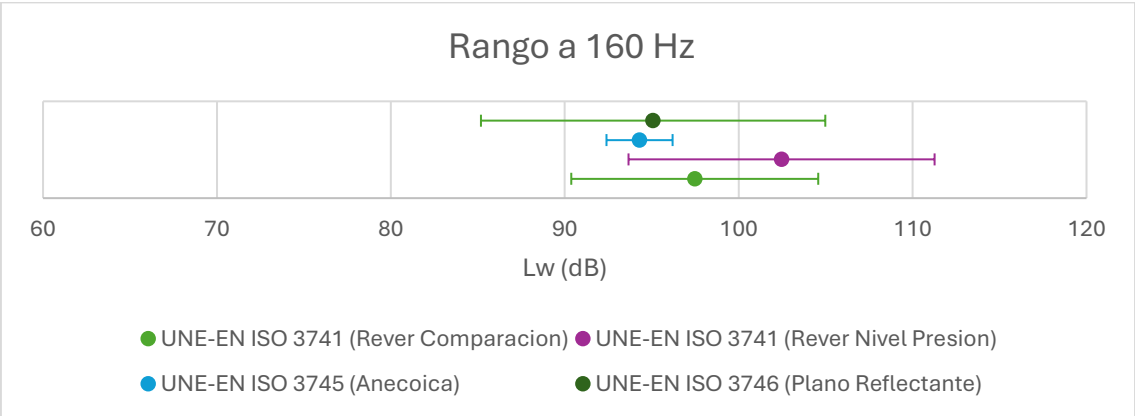
ANEXO C: GRÁFICAS DEL RANGO DE VALORES, VALOR PROMEDIO E INCERTIDUMBRE ASOCIADA, EN CUANTO AL LW (dB) DE LAS MEDICIONES REALIZADAS PARA CADA UNO DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS, POR TERCIOS DE OCTAVA



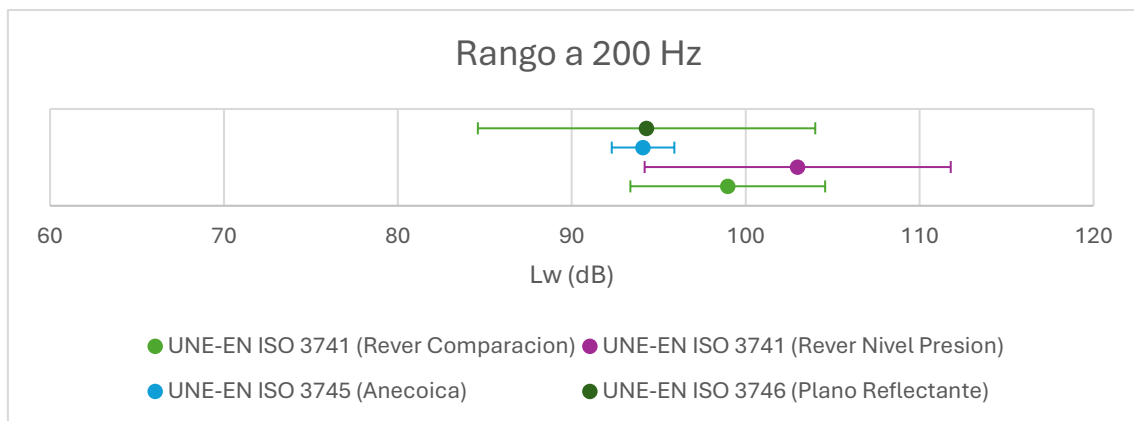
Gráfica C.1: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 100 Hz



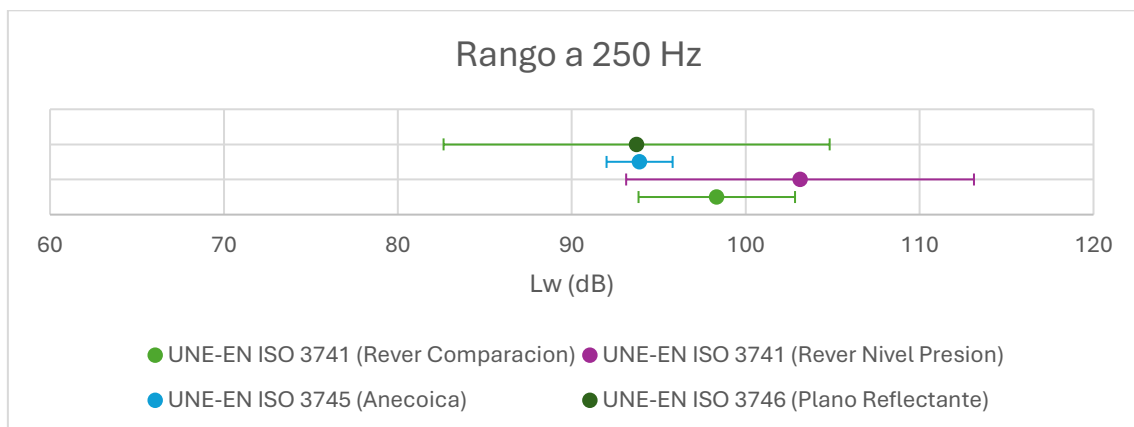
Gráfica C.2: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 125 Hz



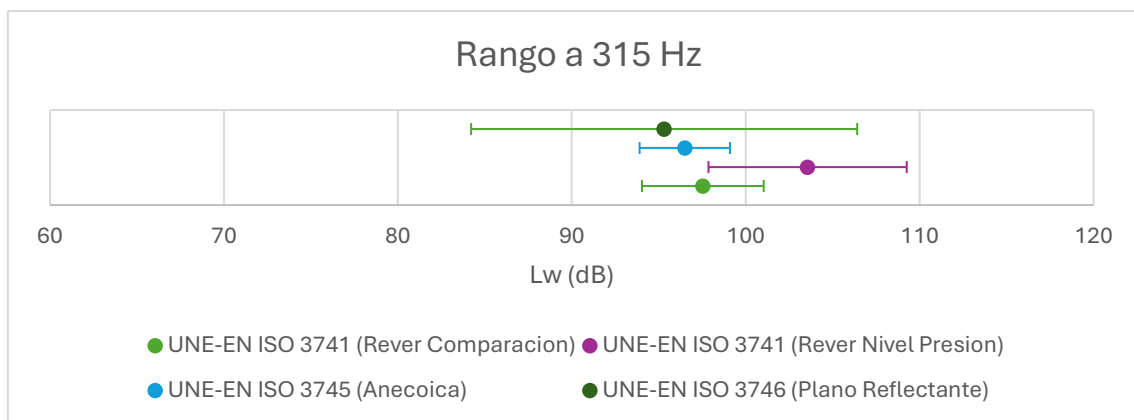
Gráfica C.3: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 160 Hz



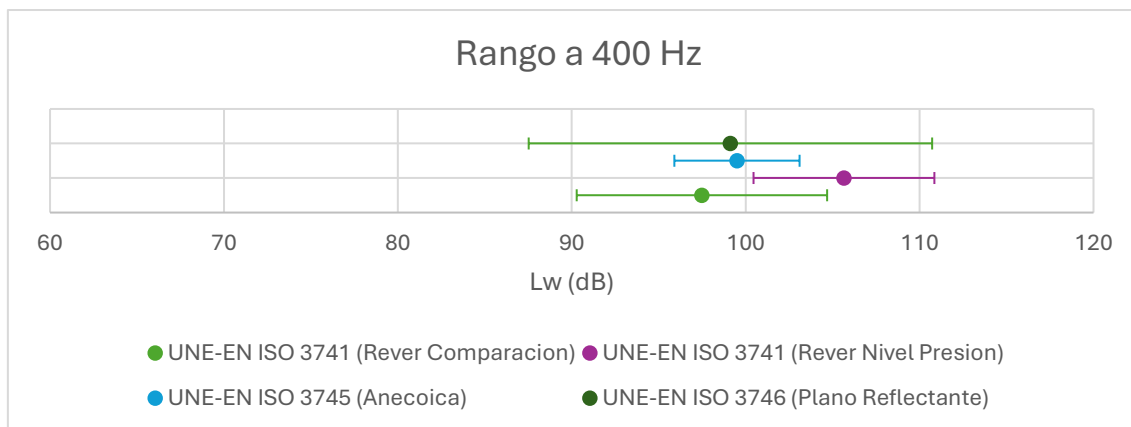
Gráfica C.4: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 200 Hz



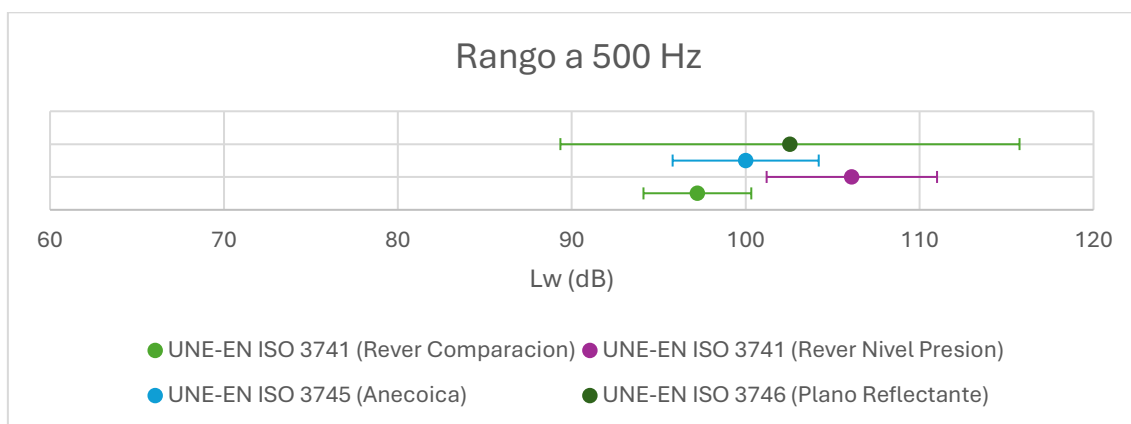
Gráfica C.5: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 250 Hz



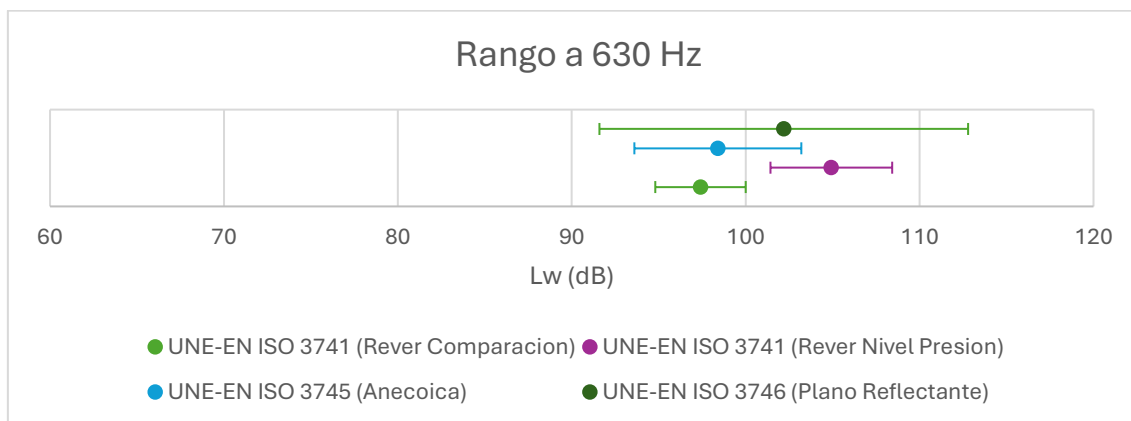
Gráfica C.6: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 315 Hz



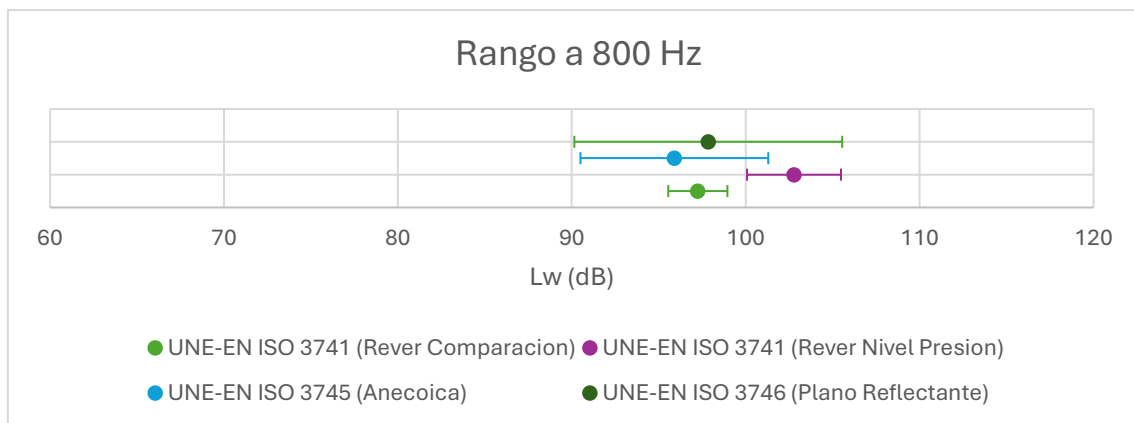
Gráfica C.7: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 400 Hz



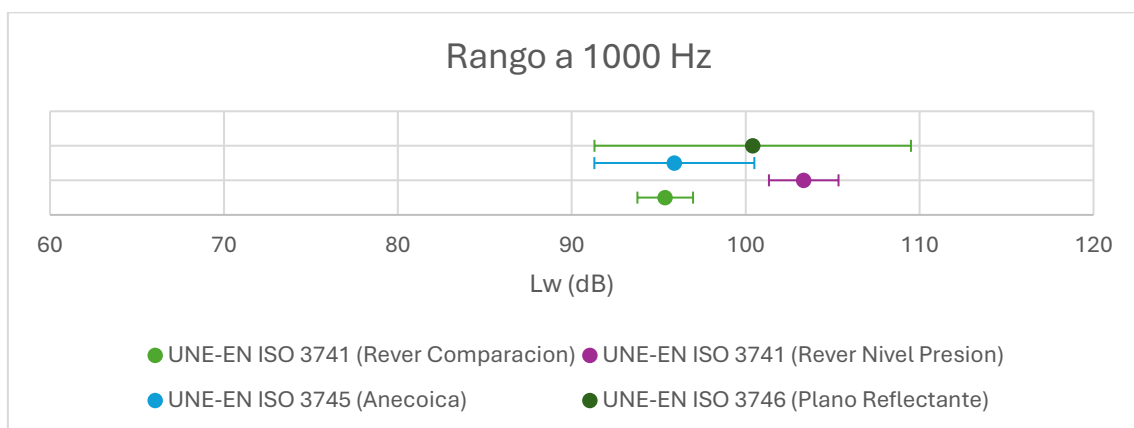
Gráfica C.8: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 500 Hz



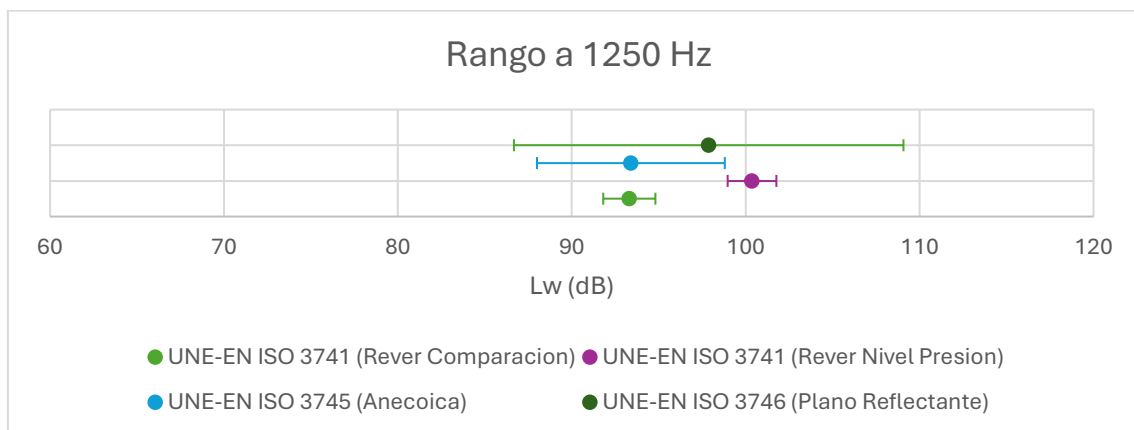
Gráfica C.9: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 630 Hz



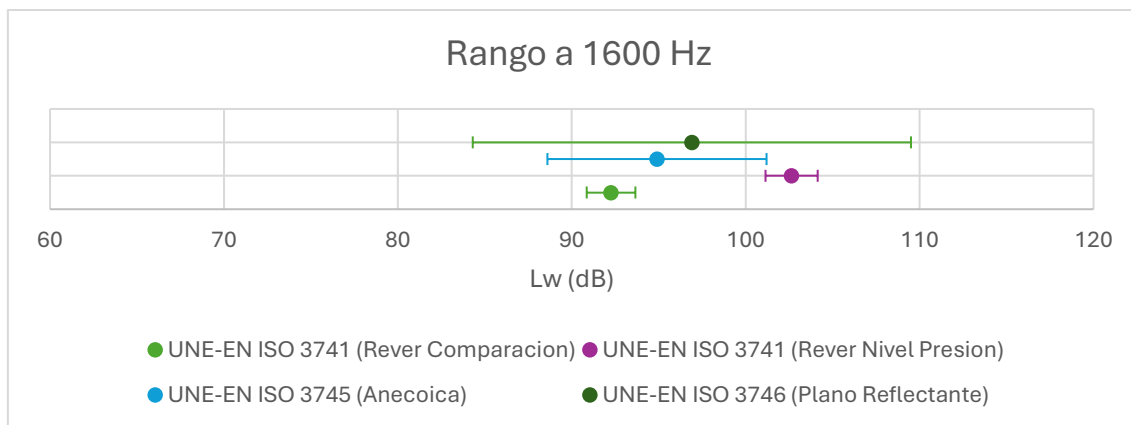
Gráfica C.10: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 800 Hz



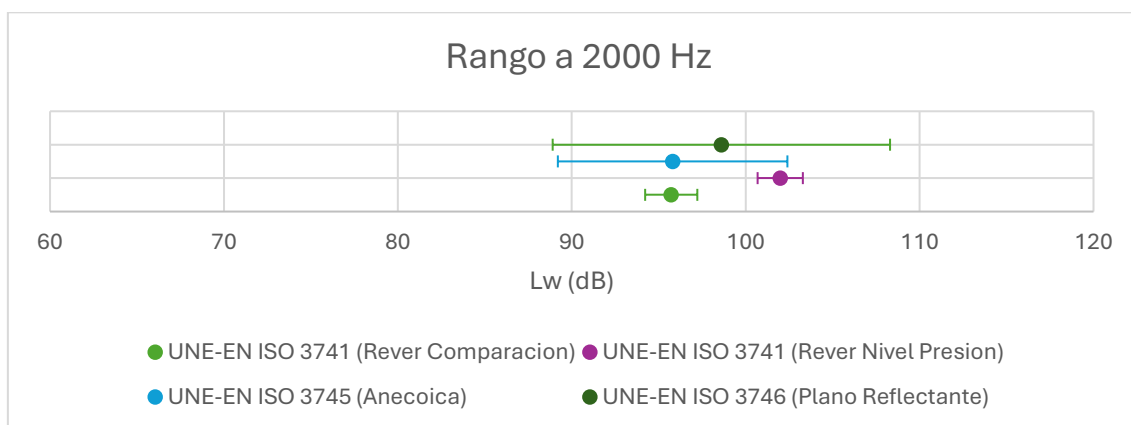
Gráfica C.11: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 1000 Hz



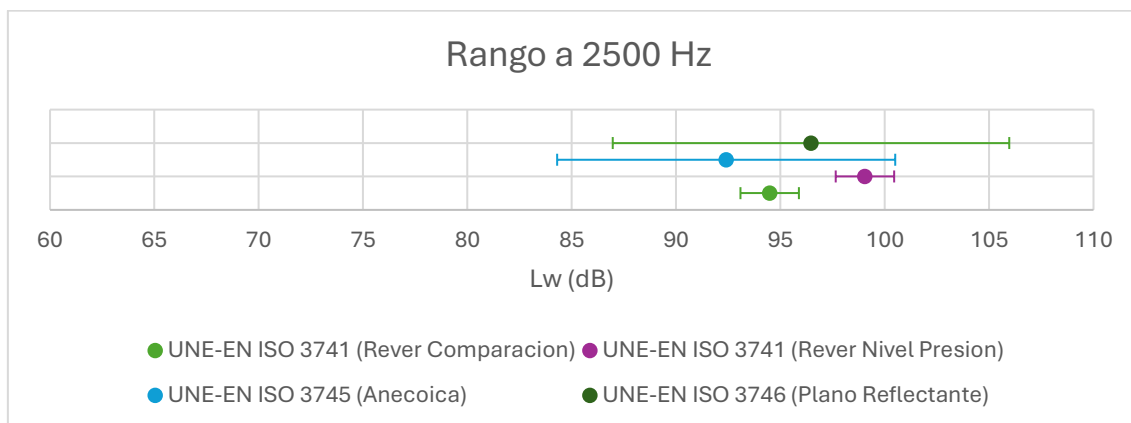
Gráfica C.12: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 1250 Hz



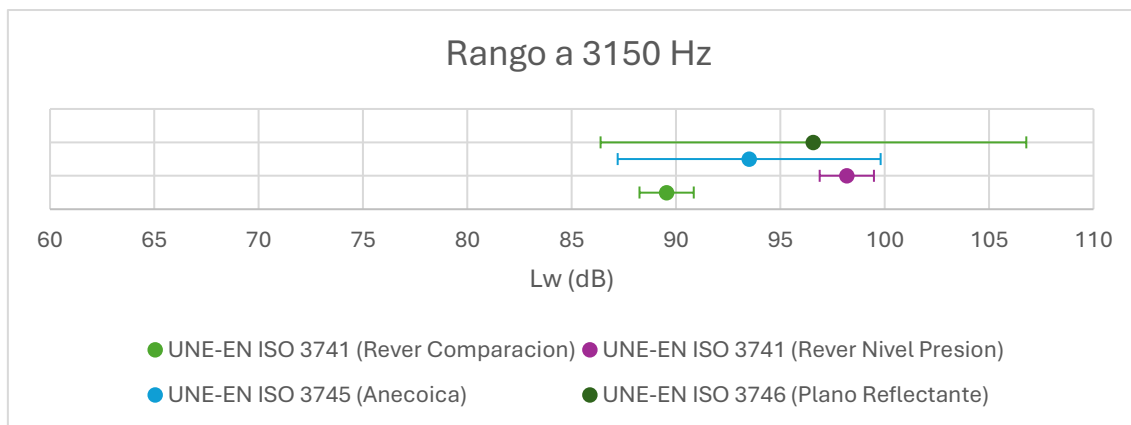
Gráfica C.13: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 1600 Hz



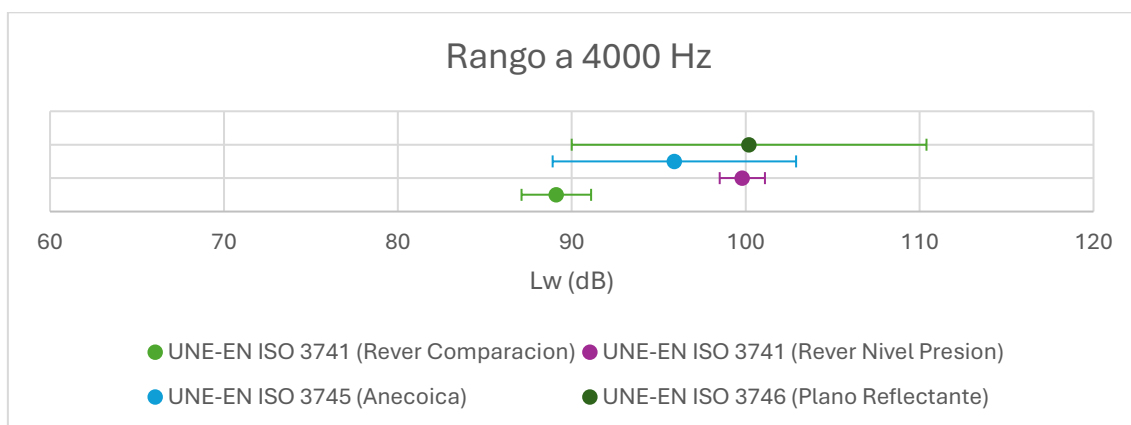
Gráfica C.14: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 2000 Hz



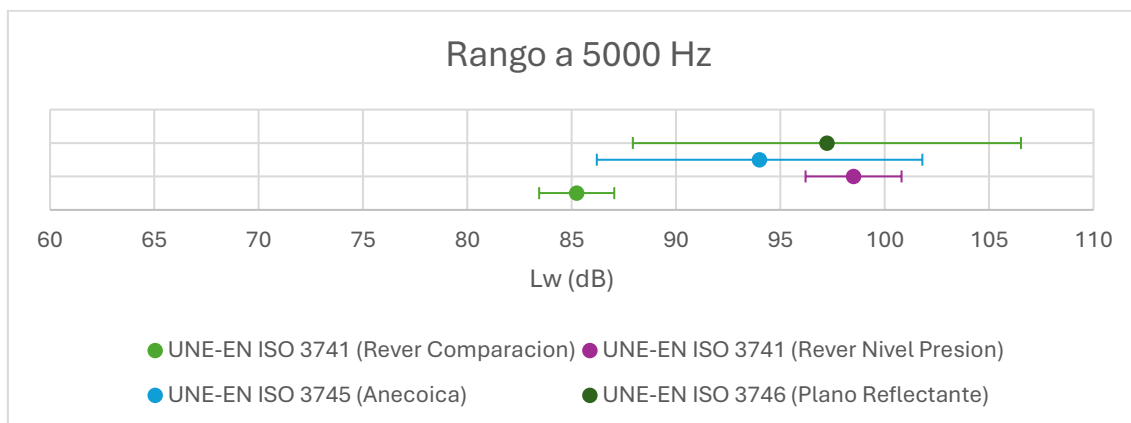
Gráfica C.15: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 2500 Hz



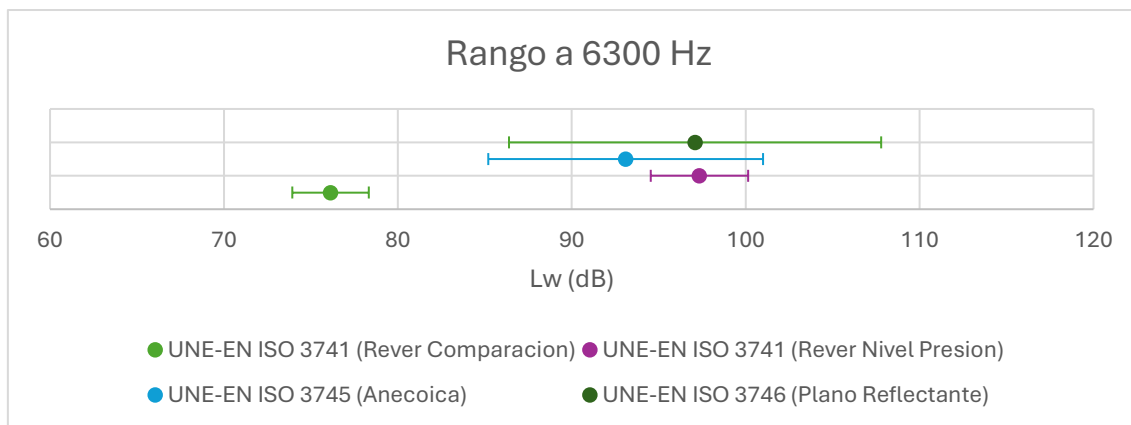
Gráfica C.16: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 3150 Hz



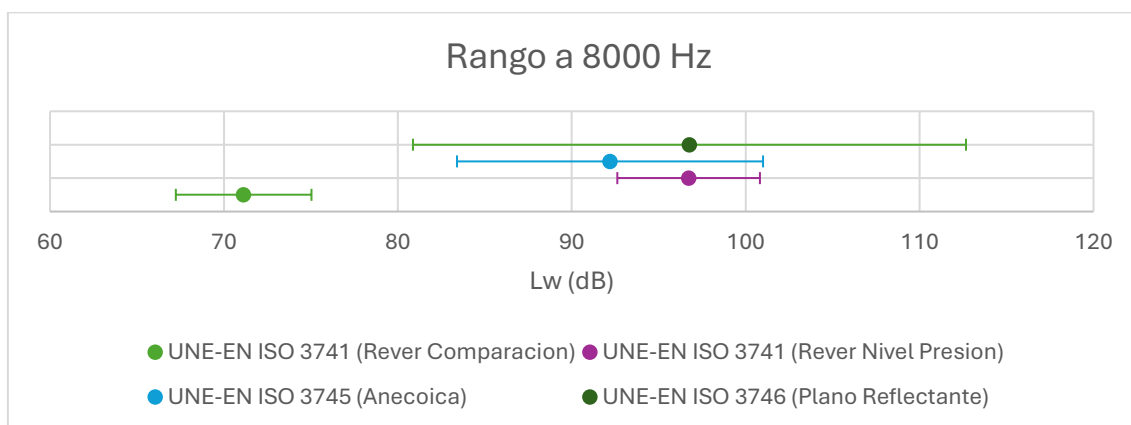
Gráfica C.17: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 4000 Hz



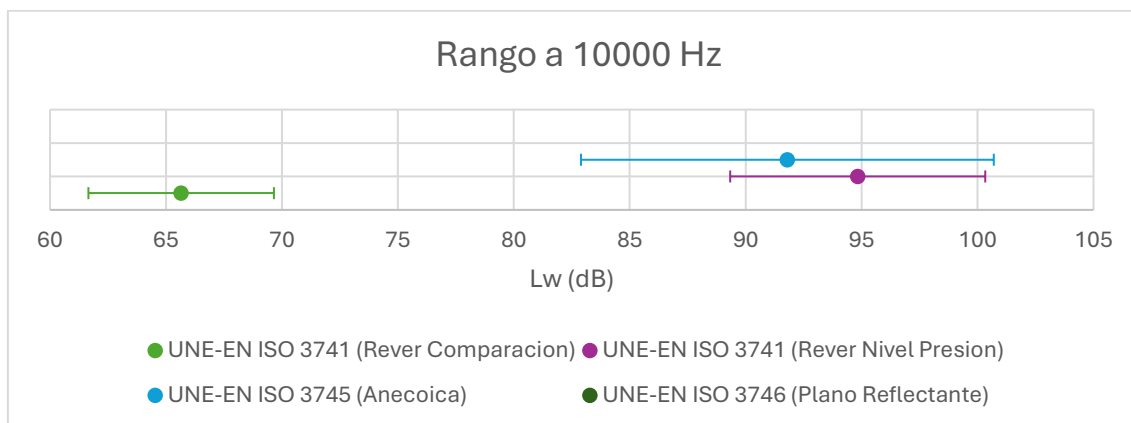
Gráfica C.18: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 5000 Hz



Gráfica C.19: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 6300 Hz



Gráfica C.20: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 8000 Hz



Gráfica C.21: Rango de valores en cuanto al LW de las mediciones realizadas en la frecuencia de 10000 Hz

ANEXO D: EXCEL CON CÁLCULOS PERTINENTES A LAS MEDICIONES REALIZADAS RESPECTO AL MÉTODO DIRECTO EN REFERENCIA A LA NORMA ISO 3741:2011

ANEXO E: EXCEL CON CÁLCULOS PERTINENTES A LAS MEDICIONES REALIZADAS RESPECTO AL MÉTODO DE COMPARACIÓN EN REFERENCIA A LA NORMA ISO 3741:2011

ANEXO F: EXCEL CON CÁLCULOS PERTINENTES A LAS MEDICIONES REALIZADAS EN REFERENCIA A LA NORMA ISO 3744:2011

ANEXO G: EXCEL CON CÁLCULOS PERTINENTES A LAS MEDICIONES REALIZADAS EN REFERENCIA A LA NORMA ISO 3745:2012

ANEXO H: EXCEL CON COMPARACIONES ENTRE LAS MEDICIONES REALIZADAS PARA ESTE ESTUDIO

ANEXO I: RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030