



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TÉCNICAS AVANZADAS DE MEDIDA
EN INTENSIMETRÍA ACÚSTICA PARA LA
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES AISLANTES**

GREGORIO MUNUERA SAURA

2008

TESIS DOCTORAL

TÉCNICAS AVANZADAS DE MEDIDA EN INTENSIMETRÍA ACÚSTICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES AISLANTES

por

Gregorio Munuera Saura
Ingeniero en Organización Industrial

Dirigida por Dr. Aniceto Valverde Martínez

Presentada para la obtención del grado de Doctor
en el programa de Tecnologías Industriales



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

2008

Trabajo presentado para optar
al Grado de Doctor por la
Universidad Politécnica de Cartagena

Cartagena, abril de 2008

Gregorio Munuera Saura

*A Javi y Maribel
para que siempre luchen
por sus ilusiones*

AGRADECIMIENTOS

La realización de una tesis doctoral es una prolija tarea que implica a quien la desarrolla y que acaba afectando a las personas que están a su lado. En mi caso así ha sido, por ello quiero agradecer la paciencia a cuantos se han visto afectados por mis momentos de desasosiego al no vislumbrar la finalización de esta Tesis. Especialmente a Maribel y mis hijos que han sufrido en primera línea los vaivenes de mi ánimo.

También quiero mostrar mi agradecimiento a Aniceto, mi director de tesis, cuyos sabios consejos han supuesto un estímulo continuado para mí, sin los cuales no sé si esta travesía habría sido posible. Pero sobre todo quiero agradecerle su amistad y compañerismo, presente desde el primer día que me incorporé a este apasionante mundo de la docencia.

*No se lo que pareceré a los ojos del mundo,
pero a los míos es como si hubiese sido un niño
jugando a la orilla del mar,
recogiendo aquí y allá una piedra más o menos lisa
o una concha de rara belleza,
mientras el gran océano de la verdad
permanece completamente invisible frente a mi.*

Isaac Newton

RESUMEN

La medida del Índice de Reducción Sonora (R) de un material aislante se determina en recintos especiales, diseñados según la norma UNE EN ISO 140-1. La construcción de una sala de ensayo que cumpla con los criterios normalizados requiere de una inversión económica importante, no siempre al alcance de las empresas fabricantes de máquinas en general. Los equipos de uso al aire libre se tienen que diseñar considerando los límites de emisión sonora establecidos en la Directiva Europea 2000/14, siendo necesario el montaje de materiales aislantes en los cerramientos de las máquinas.

Los suministradores de materiales aislantes para uso industrial normalmente no aportan las propiedades aislantes de sus productos, que suelen obtenerse a partir de lana de roca, polietileno, poliuretano, caucho sintético, etc. Resulta difícil ensayar estos materiales que se caracterizan por su baja densidad superficial en una sala normalizada, cuyo procedimiento de ensayo está basado en la medida de la presión sonora. El problema principal es conseguir la validación de las medidas cuando el Índice de Reducción Sonora es relativamente bajo, como es el caso de estos materiales.

En la presente Tesis Doctoral se plantea un procedimiento alternativo, basado en la medida de la intensidad sonora. El carácter vectorial de este parámetro permite medir solamente el flujo de energía que fluye a través de una superficie definida. La validación de las medidas se consigue aplicando los criterios establecidos en la norma UNE EN ISO 9614 con el mayor grado de precisión. Para la realización de los ensayos se ha diseñado una caja de chapa acero de 6 milímetros de espesor donde se introduce una fuente sonora que amplifica una señal de ruido rosa. Frente a la fuente se coloca una

probeta del material a ensayar, se conecta y se mide la intensidad sonora transmitida con una sonda formada por dos micrófonos enfrentados. Previamente se ha determinado el flujo de energía acústica que incide sobre la probeta. La diferencia entre las dos medidas es directamente el Índice de Reducción Sonora. La principal ventaja de este procedimiento de ensayo radica en que se puede realizar en una sala de dimensiones normales y sin acondicionamiento específico.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el comportamiento vibroacústico de la caja de ensayo y su influencia en las medidas. Para ello, se ha realizado un ensayo de análisis modal sobre una probeta de acero de características semejantes a los cerramientos de la caja. También se ha realizado un modelo matemático basado en el Análisis Estadístico de Energía SEA, para estimar los caminos de transmisión de la energía desde la fuente sonora hasta el punto de medida con la sonda de intensidad acústica. El software comercial utilizado es AUTOSEA2 LT.

Tras el análisis de resultados se han obtenido conclusiones generales respecto del método alternativo de medida y conclusiones específicas relacionadas con la capacidad aislante de los materiales ensayados. En cuanto a las conclusiones generales: se han comprobado las limitaciones de medida de la sonda de intensidad a baja y alta frecuencia, se ha conseguido validar las medidas con una precisión de 0,5 dB según los criterios establecidos en la norma UNE EN ISO 9614 parte 3, en definitiva, se ha establecido un procedimiento de ensayo novedoso y sencillo para determinar el Índice de Reducción Sonora de un material aislante de baja densidad superficial.

Por último, el procedimiento ideado permitirá futuros desarrollos en el campo de la vibroacústica, tales como, la aplicación del principio de reciprocidad y la determinación de la impedancia acústica de materiales por técnicas de intensimetría acústica.

ABSTRACT

The measurement rate of acoustic reduction (R) in an insulating material is determined in special designed enclosures according to UNE EN ISO 140-1 standard. The construction of a testing room that complies with the standards requires a significant financial investment, that too often can not be provided by general machinery manufacturers. The outdoor machines have to be designed considering the noise emission limits established in the European Directive 2000/14, making the installment of insulating materials in enclosures of machines necessary.

Suppliers of insulating materials for industrial use does not normally provide the insulating properties of their products, which are often obtained from rock wool, polyethylene, polyurethane, synthetic rubber, etc. It is difficult to test these materials that are characterized by low density surface in a room standardized test procedure that is based on the measurement of sound pressure. The main problem is getting the validation of the measurement when the rate of acoustic reduction is relatively low, as in the case of materials mentioned above.

An alternative procedure is proposed in this Doctoral Thesis based on the measurement of sound intensity. The vector nature of this parameter allows just the flow of energy through a given surface to be measured. The validation of the measurement is achieved with the highest degree of accuracy by applying the criteria included in the standard UNE EN ISO 9614. A steel plate 6 mm thick incorporated with a sound source for amplification of a pink noise signal is designed for carrying out the tests.

Faced with the source is placed a piece of material to test. The source is connected and the transmitted sound intensity is measured with a probe consisting of two microphones located opposite one another. Previously it has been determined the flow of acoustic energy that impinges on the piece. The difference between the two measures provides directly the rate of acoustic reduction. The main advantage of the described test procedure is that it can be done in a room with normal dimensions and without specific conditioning.

The vibroacoustic behaviour of the testing box and its influence on the measures is another important aspect to be considered. A test of modal analysis has been carried out with a steel plate similar to the enclosures of the box. A mathematical model based on the Statistical Energy Analysis SEA has been developed to estimate the paths of energy transmission from the sound source to the point of measurement with the sound intensity probe. The commercial software AUTOSEA2 LT is used.

General conclusions regarding the alternative method of measurement and specific ones related to the capacity of insulation of the tested materials have been obtained. As for the general conclusions, the limitations of measuring with the intensity probe at low and high frequencies have been proved, validating measurements with an accuracy of 0.5 dB according to the criteria set forth in the standard UNE EN ISO 9614 Part 3 have been obtained, and a new test procedure for easy determination of the rate of acoustic reduction of an insulating material with low density surface has been established.

Finally, the devised procedure allows future developments in the field of vibroacoustic, such as the application of the principle of reciprocity and the determination of acoustic impedance of materials by application of techniques for measuring of acoustics intensity.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice general	III
Índice de tablas	IV
Índice de figuras	V
Nomenclatura	VI
1.- Introducción y objetivos	1
1.1.- Introducción	1
1.2.- Objetivos	2
1.3.- Metodología	4
1.4.- Estructura y planteamiento	6
2.- El estado del arte	9
2.1.- Introducción	9
2.2.- Antecedentes históricos en la Antigüedad	10
2.3.- El Renacimiento, el nuevo amanecer para la Ciencia	14
2.4.- El siglo XIX, la época dorada para los grandes inventores	17
2.5.- Lord Rayleigh, el nacimiento de la acústica moderna	24

2.6.- El siglo XX, la era de la electrónica	26
2.7.- La medida de la intensidad sonora en los últimos cincuenta años	33
2.8.- El nuevo milenio, la técnica de medida alcanza su madurez	43
3.- Fundamentos de la medida de la intensidad sonora	49
3.1.- Introducción	49
3.2.- Definición y propiedades de los parámetros acústicos	50
3.2.1.- Presión e intensidad sonora	50
3.2.2.- Potencia sonora	51
3.2.3.- Relación entre presión, intensidad y potencia sonora	52
3.2.4.- Unidades de medida de los parámetros relacionados con la intensidad sonora y niveles de referencia	53
3.2.5.- Algunas propiedades de la intensidad sonora	55
3.3.- Principios básicos sobre la intensidad sonora	60
3.4.- Campos sonoros activos y reactivos	63
3.4.1.- Ondas estacionarias en un tubo	64
3.4.2.- Campo próximo y lejano de una fuente	65
3.4.3.- Componentes activa y reactiva de la intensidad sonora	66
3.5.- Teoría básica de la medida de la intensidad sonora	68
3.5.1.- Fundamentos de la sonda de intensidad del tipo p-p	69
3.5.2.- Procesado de señal con una sonda de intensidad del tipo p-p	77
3.5.3.- Direccionalidad de la sonda de intensidad del tipo p-p	82
3.5.4.- Fundamentos de la sonda de intensidad del tipo p-u	83
3.5.5.- Procesado de señal con una sonda de intensidad del tipo p-u	86
3.5.6.- Índice de reactividad. Valoración del campo reactivo	88
4.- Validación y precisión del método de barrido para la medida de la intensidad sonora	91

4.1.- Introducción	91
4.2.- Errores y limitaciones en la medida de la intensidad sonora	92
4.2.1.- Error debido a la aproximación por diferencias finitas a alta frecuencia	92
4.2.2.- Error debido al desajuste de fase de la instrumentación de medida a baja frecuencia	96
4.2.3.- Limitaciones en frecuencia de los espaciadores comerciales de micrófonos	98
4.2.4.- Limitaciones en frecuencia debidas al índice de reactividad. Nomograma de intensidad sonora	99
4.2.5.- Limitaciones a baja frecuencia debidas al desajuste de fase de la instrumentación y al índice de reactividad	106
4.2.6.- Error de medida debido a la presencia de la propia sonda de intensidad en el campo sonoro	110
4.2.7.- Error de medida en el campo próximo	111
4.2.8.- Resumen de los requisitos para la validación de las medidas de intensidad en función de la frecuencia	113
4.2.9.- Error aleatorio	115
4.3.- Precisión en la medida de la intensidad sonora por el método de barrido	116
4.3.1.- Incertidumbre en la medida de la intensidad sonora	116
4.3.2.- Caracterización del entorno acústico	119
4.4.- Indicadores de campo y metodología de la medida del nivel de intensidad sonora	120
4.4.1.- Determinación de la superficie de medida	120
4.4.2.- Determinación de las trayectorias de barrido	122
4.4.3.- Determinación del tiempo de barrido	123
4.4.4.- Comprobación de la repetibilidad del barrido en una superficie parcial	125

4.4.5.- Comprobación del índice presión-intensidad	126
4.4.6.- Comprobación de la presencia de fuentes externas	128
4.5.- Procedimiento de medida general y de optimización de la precisión de las medidas de intensidad sonora	128
5.- Recursos materiales y técnicos. Procedimientos de ensayo	133
5.1.- Introducción	133
5.2.- Recursos materiales	134
5.2.1.- Estructura para la realización de los ensayos	134
5.2.2.- Materiales de las probetas ensayadas	136
5.3.- Recursos técnicos	138
5.3.1.- Fuente sonora	138
5.3.2.- Sonda de intensidad sonora	140
5.3.3.- Procesado de las medidas con sonómetros modelo 2260 B&K	144
5.3.4.- Analizador multicanal PULSE de B&K	147
5.3.5.- Introducción a la modelización SEA	152
5.3.6.- Fundamentos del modelado SEA	154
5.3.7.- El concepto de subsistema en el modelado SEA	155
5.3.8.- Propiedades de los subsistemas, densidad y superposición modal	156
5.3.9.- La energía como variable en el modelado SEA	157
5.3.10.- Ecuaciones de balance de potencia SEA	157
5.3.11.- Modelización con AutoSEA2 LT	162
5.4.- Procedimientos de ensayo	166
5.4.1.- Procedimiento de ensayo para la determinación del Índice de Reducción Sonora (R)	166
5.4.2.- Procedimiento de ensayo para determinar los parámetros modales y su relación con la intensidad sonora radiada por la chapa de acero (M5)	168

6.- Análisis y discusión de resultados	173
6.1.- Introducción	173
6.2.- Verificación de la repetibilidad de las medidas	174
6.2.1.- Repetibilidad e las medidas de intensidad sonora	174
6.2.2.- Validación de la repetibilidad según UNE EN ISO 9614	180
6.3.- Verificación de la capacidad dinámica	189
6.4.- Verificación de la diferencia de intensidad sonora en posición normal e invertida de la sonda	194
6.5.- Índices de reducción sonora	195
6.6.- Resultados de los ensayos modales sobre la probeta de acero (M5)	198
6.6.1.- Frecuencias resonantes de la probeta de acero (M5)	199
6.7.- Análisis de los resultados obtenidos con AutoSEA2 LT	203
6.7.1.- Propagación de la energía vibroacústica en la estructura	204
6.7.2.- Comportamiento vibratorio de la probeta de acero (M5) sometida al campo acústico generado por la fuente sonora	206
6.7.3.- Resultados estimados para la presión sonora	208
6.7.4.- Comparación entre niveles sonoros estimados y medidos	209
7.- Conclusiones	213
7.1.- Conclusiones generales	214
7.2.- Conclusiones específicas	215
7.3.- Desarrollos futuros	217
Referencias	219

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Estructura de ensayo construida con angulares y forrada con chapa de acero de 6 mm de espesor. Las probetas se montan en la parte delantera cerrando la apertura para la fuente.

Figura 2.1.- Teatro de Epidauro construido en la Antigua Grecia en el año IV a.C.

Figura 2.2.- Isaac Newton estudiando la naturaleza de la luz.

Figura 2.3.- Botella de Leyden, primer condensador eléctrico.

Figura 2.4.- Sturm y Colladon midiendo por primera vez de forma precisa en un lago la velocidad del sonido en el agua.

Figura 2.5.- David Edward Hughes inventor del primer micrófono.

Figura 2.6.- Primer sistema de impresión de telegramas inventado por Hughes.

Figura 2.7.- Rudimentario micrófono atribuido a Hughes.

Figura 2.8.- Esquema del micrófono de carbón patentado por Emile Berliner.

Figura 2.9.- John William Strull, tercer barón Rayleigh.

Figura 2.10.- Portada de la obra La Teoría del Sonido y firma de John William Strull.

Figura 2.11.- Lee de Forest con su Audion patentado el 15 de enero de 1907.

Figura 2.12.- Lee de Forest con su primer receptor de radio comercial a la izquierda. En la derecha trabajando en la incorporación del sonido a una película de cine.

Figura 2.13.- A la izquierda un micrófono de carbón de principios del siglo XX. En el centro Edward C. Wentz y a la derecha el primer micrófono de condensador comercializado por Western Electric.

Figura 2.14.- Harry F. Olson ingeniero durante cuarenta años de la RCA.

Figura 2.15.- Micrófono de cinta bidireccional a la izquierda y unidireccional a la derecha patentados por Harry F. Olson para la RCA.

Figura 2.16.- En la figura se muestra el plano original que utilizó Olson para patentar el primer sistema capaz de medir la intensidad sonora.

Figura 2.17.- Primer equipo portátil para medida de sonido capaz de hacer espectros en frecuencia.

Figura 2.18.- Sonómetro patentado por Paul L. Michael en 1963, representativo de los equipos existentes a principio de los años sesenta.

Figura 2.19.- En la figura se muestra el circuito original del vatímetro acústico que patentó Theodore J. Schultz.

Figura 2.20.- Esquema del sistema de medida patentado por J.Y. Chung en 1978.

Figura 2.21.- Detalle de los micrófonos y del separador de una sonda p-p.

Figura 2.22.- Imagen de la sonda del tipo p-p frente a la sonda microflown del tipo p-u.

Figura 2.23.- Sonda del tipo p-u diseñada por Paul C. Janzen, combina un acelerómetro y un micrófono de forma compacta.

Figura 2.24.- En la parte superior de la figura se muestra el array de micrófonos necesario para aplicar la Holografía a campos sonoros estacionarios y no estacionarios. En la parte inferior, se puede apreciar en la imagen cartografiada, la evolución del campo sonoro y la contribución de las distintas fuentes sonoras.

Figura 2.25.- Representación gráfica del principio de reciprocidad en vibroacústica.

Figura 2.26.- A la izquierda varias sondas del tipo p-u miden la velocidad normal a una superficie de un automóvil. A la derecha el método de la ventana utilizado para medir la misma superficie con una sonda del tipo p-p.

Figura 2.27.- Sistema de holografía en campo cercano (NAH) con array de Microflows.

Figura 2.28.- Resultados obtenidos de la medida de un altavoz utilizando: Beamforming a 100 cm y a 55 cm, NAH a 12 cm y con una sonda de intensidad tipo p-p.

Figura 2.29.- Dos arrays de transductores de tecnología diferente utilizados para el estudio de campos sonoros. A la izquierda construido con sensores microflown y a la derecha con micrófonos.

Figura 2.30.- Distribución del campo sonoro alrededor de un plato rectangular a las frecuencias de 678 Hz, 866 Hz, 917 Hz y 1090 Hz.

Figura 2.31.- La figura muestra el principio de funcionamiento de la sonda de intensidad óptica. A la izquierda una imagen ampliada de la membrana y del elemento reflectante y a la derecha un esquema funcional del transductor.

Figura 3.1.- Analogía entre la energía acústica y la calorífica.

Figura 3.2.- Cuando la propagación del campo sonoro es en campo libre, la presión y la intensidad sonora disminuyen con la distancia; mientras que, la potencia permanece constante al ser independiente del punto de medida.

Figura 3.3.- Comparación de las escalas en pascales y en decibelios.

Figura 3.4.- Nivel de intensidad resultante entre dos fuentes que emiten energía sonora en términos de intensidad en la misma dirección, pero en sentido contrario.

Figura 3.5.- Cálculo numérico del nivel de intensidad resultante por la acción de dos fuentes.

Figura 3.6.- Procedimiento aproximado de cálculo de la intensidad resultante en un punto del espacio, por la acción de dos fuentes que emiten energía sonora en términos de intensidad en la misma dirección pero en sentido contrario.

Figura 3.7.- Balance del flujo de energía acústica a través de una superficie.

Figura 3.8.- Componentes de la presión sonora en un punto del espacio y en un lugar geográfico.

Figura 3.9.- El campo sonoro que se genera en el interior de un tubo de impedancia es reactivo puro.

Figura 3.10.- Distribución del campo sonoro en la proximidad de una fuente que vibra.

Figura 3.11.- El producto de la presión sonora por la velocidad de las partículas del medio en fase, permite obtener la intensidad sonora de un campo activo puro.

Figura 3.12.- La intensidad sonora promedio es cero cuando la presión sonora y la velocidad de las partículas del aire están desfasadas 90 grados, característica principal de un campo reactivo puro.

Figura 3.13.- El producto de la longitud de onda λ multiplicada por la frecuencia f es una constante que se corresponde con la velocidad de propagación c de la onda sonora.

Figura 3.14.- Determinación del gradiente de presiones con una sonda de intensidad del tipo p-p.

Figura 3.15.- Función de transferencia de un integrador ideal.

Figura 3.16.- Determinación paso a paso de la intensidad sonora con dirección de propagación positiva.

Figura 3.17.- Determinación de la intensidad sonora con dirección de propagación negativa.

Figura 3.18.- Relación entre los parámetros acústicos.

Figura 3.19.- Esquema de bloque de un analizador que utiliza el método directo.

Figura 3.20.- Características direccionales de la sonda de intensidad. El vector medido por la sonda es el representado por \mathbf{I}_r , que se corresponde con la componente activa de la intensidad sonora.

Figura 3.21.- Detalle de la colocación de los hilos ultrafinos de platino de una sonda del tipo p-u.

Figura 3.22.- Diferencia del gradiente de temperaturas en la zona próxima al hilo de platino.

Figura 3.23.- Diferencia de temperatura entre los dos hilos de platino.

Figura 3.24.- Medida de temperaturas de los hilos de platino afectados por una onda sonora.

Figura 3.25.- Esquema de acondicionamiento de la señal para una sonda del tipo p-u.

Figura 3.26.- Detalle constructivo de una sonda de intensidad sonora del tipo p-u.

Figura 3.27.- Diagramas polares de la sensibilidad de la sonda a distintas frecuencias y en función de la dirección de propagación de la onda sonora.

Figura 4.1.- Medida del gradiente de presión a baja y alta frecuencia. A baja frecuencia la aproximación por diferencias finitas es correcta, y a alta frecuencia el error es considerable.

Figura 4.2.- Error cometido, según el tipo de espaciador utilizado de 12 mm ó 50 mm, en la aproximación por diferencias finitas del gradiente de presión.

Figura 4.3.- Error cometido al restarse el desfase entre canales del equipo de medida con $\varphi=0,25$ para separadores de 12 mm y 50 mm.

Figura 4.4.- Error cometido al adicionarse el desfase entre canales del equipo de medida con $\varphi=0,25$ para separadores de 12 mm y 50 mm.

Figura 4.5.- Limitaciones en frecuencia en la medida de la intensidad sonora en función de los distintos tamaños comerciales del separador de los micrófonos. Las medidas a baja frecuencia deben realizarse con el separador de 50 mm, mientras que a alta frecuencia el ideal es el de 6 mm.

Figura 4.6.- Índice de reactividad L_K frente a la frecuencia para un separador de 12 mm y un desajuste de fase entre canales del equipo de medida de $\varphi = 0,35$.

Figura 4.7.- Índice de reactividad L_K frente a la frecuencia para un separador de 50 mm y un desajuste de fase entre canales del equipo de medida de $\varphi = 0,35$.

Figura 4.8.- Variación de la fase entre micrófonos con un índice de reactividad $L_K = -10$ dB y un separador de micrófonos de 12 mm.

Figura 4.9.- Una incorrecta orientación de la sonda disminuye la distancia efectiva entre micrófonos. La intensidad sonora medida es menor debido a la mala orientación de la sonda.

Figura 4.10.- Determinación experimental del índice de intensidad residual. La sonda es conectada a una señal patrón donde ambos micrófonos reciben la misma señal.

Figura 4.11.- Error por desajuste de fase en la medida de la intensidad sonora.

Figura 4.12. Determinación de la capacidad dinámica teniendo en cuenta el índice de intensidad residual y el índice de reactividad para una precisión de ± 1 dB.

Figura 4.13.- Compensación del error a alta frecuencia con separador de micrófonos de 12 mm.

Figura 4.14.- Error cometido en la medida de la intensidad en el campo próximo de una fuente sonora.

Figura 4.15.- Error cometido en la medida de la intensidad sonora en función de la distancia de medida y la longitud del espaciador.

Figura 4.16. Distintos rangos de uso en frecuencia dependiendo del espaciador, ángulo de desajuste de fase ϕ y del índice de reactividad L_K para una precisión de la medida de ± 1 dB.

Figura 4.17. (a) El flujo de energía procedente de la fuente externa atraviesa íntegramente la superficie de medida, no produciéndose error en la medida. (b) La energía entrante es absorbida parcialmente en el interior de la fuente objeto de ensayo, produciéndose un error en la medida.

Figura 4.18. Ejemplos de determinación de las superficies de medida en torno a las fuentes.

Figura 4.19. Ejemplos de trayectorias ortogonales de barrido de una superficie parcial de medida.

Figura 4.20. Distintos métodos de muestreo para obtener el indicador de variabilidad temporal.

Figura 4.21. Esquema secuencial para optimizar la precisión de la medida de la intensidad sonora.

Figura 5.1.- Dimensiones de la sala de ensayo y disposición de la fuente sonora en el recinto.

Figura 5.2.- Dimensiones principales de la caja de acero que interiormente ha sido forrada de material aislante. El área de color azul cielo es la zona donde se colocan las probetas objeto de ensayo.

Figura 5.3.- Material aislante utilizado en el forrado del interior de la caja de ensayo.

Figura 5.4.- Relación de materiales ensayados: M1 polietileno, M2 caucho sintético, M3 lana de roca, M4 lana de roca con revestimiento y M5 acero de 6 mm. A la derecha se muestra el montaje de la probeta M2 en la estructura de ensayo.

Figura 5.5.- Fuente sonora 4224 de la firma comercial Brüel & Kjaer empleada en los ensayos.

Figura 5.6.- Características direccionales de la fuente sonora modelo 4224 de la marca comercial Brüel & Kjaer.

Figura 5.7.- Sonda de intensidad modelo 3595 de B&K utilizada en la realización de las medidas.

Figura 5.8.- Índices presión-intensidad residual de la sonda modelo 3595 de la marca Brüel & Kjaer en función de los distintos separadores. En rojo el índice correspondiente al separador de 18 mm, fabricado para realizar medidas desde 100 Hz hasta 3150 Hz.

Figura 5.9.- Sonómetro modelo 2260 Investigator de B&K, con la sonda de intensidad acoplada.

Figura 5.10.- Calibrador modelo 4297 de B&K utilizado para calibrar individualmente la presión sonora y la obtención del índice presión-intensidad residual de la cadena de medida.

Figura 5.11.- A la izquierda un espectro de potencia sonora de un electrodoméstico obtenido a partir de la medida de la intensidad sonora. A la derecha se muestra la repetibilidad entre barridos para cada frecuencia según la norma ISO 9614-2.

Figura 5.12.- Detalle de la sonda de intensidad utilizada con PULSE de B&K. La unidad de control remoto ZH 0632 a la que se ha acoplado la sonda facilita la realización de las medidas.

Figura 5.13.- Detalle de la composición de un acelerómetro Delta Tron modelo 4508 B de B&K. También se muestra el procedimiento de sujeción del acelerómetro por medio de un clip de montaje.

Figura 5.14.- Dimensiones y pesos de los distintos elementos del martillo diseñado para realizar las medidas de análisis modal.

Figura 5.15.- A la izquierda la plataforma PULSE utilizada conectada a un ordenador portátil. A la derecha la pantalla con los cuatro organizadores abiertos.

Figura 5.16.- La analogía hidráulica describe perfectamente los fundamentos del método SEA.

Figura 5.17.- El solapamiento modal está relacionado con el número de modos por ancho de banda y con el factor de pérdida por amortiguamiento de cada modo, que tienen que ver con la anchura de cada pico resonante.

Figura 5.18.- Principio básico del balance de potencia en SEA.

Figura 5.19.- El plato 1 con bajo solapamiento modal tiene varianza alta y la energía media se predice con peor ajuste. Por el contrario, el plato 2 tiene alto solapamiento modal y su varianza toma un valor pequeño, la predicción de la energía media es entonces más precisa.

Figura 5.20.- En la figura se puede apreciar a la izquierda la Browser Window donde se define las características de los elementos del modelo, y a la derecha, la 3D window donde se visualiza el modelo de forma gráfica.

Figura 5.21.- El programa AutoSEA2 facilita simultáneamente los resultados de forma gráfica y tabulada.

Figura 5.22.- El termograma muestra la energía aportada por cada componente del modelo con una escala de colores a la frecuencia de 125 Hz.

Figura 5.23.- Distribución gráfica del flujo de energía en el modelo a la frecuencia de 200 Hz.

Figura 5.24.- A la izquierda la caja de ensayo sin probeta y a la derecha con una probeta de lana de roca sujeta por medio de un marco de acero inoxidable.

Figura 5.25.- Representación gráfica del procedimiento de medida donde se puede apreciar la zona de barrido y la distancia entre la sonda y la caja de ensayo.

Figura 5.26.- Distribución de puntos de medida sobre la chapa de acero de 6 mm de espesor.

Figura 5.27.- Algunas de las pantallas de configuración del set-up de medida del analizador multicanal PULSE de B&K.

Figura 5.28.- Procedimiento de medida de la intensidad sonora y la velocidad de vibración de la probeta de acero al ser excitada con el martillo que lleva incorporado el sensor de fuerza.

Figura 6.1.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta de polietileno (M1) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

Figura 6.2.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta de caucho sintético (M2) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

Figura 6.3.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas sobre una probeta de roca volcánica impregnada con resina (M3) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

Figura 6.4.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta de roca volcánica impregnada con resina y con revestimiento por una cara (M4) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

Figura 6.5.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta de chapa de acero de 6 mm de espesor (M5) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

Figura 6.6.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta de poliuretano base poliéster (M6) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

Figura 6.7.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta combinada de chapa de acero con poliuretano base poliéster (M5 + M6) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

Figura 6.8.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con la fuente sonora sin probeta interpuesta en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

Figura 6.9.- En el gráfico superior se muestra la repetibilidad de las cinco medidas realizadas sobre la probeta de polietileno (M1), frente a los límites especificados en la normativa. En el gráfico inferior la repetibilidad de una medida que cumple con el límite de la UNE EN ISO 9614-3

Figura 6.10.- En el gráfico superior se muestra la repetibilidad de las cinco medidas realizadas sobre la probeta de caucho sintético (M2), frente a los límites especificados en la normativa. En el gráfico inferior la repetibilidad de una medida que cumple con el límite de la UNE EN ISO 9614-3.

Figura 6.11.- Valores de la repetibilidad de la probeta de lana de roca (M3).

Figura 6.12.- Valores de la repetibilidad de la probeta de lana de roca (M4) con revestimiento.

Figura 6.13.- Valores de la repetibilidad obtenida al ensayar la probeta de chapa de acero de 6 milímetros de espesor (M5).

Figura 6.14.- Valores de la repetibilidad obtenidos con la probeta de poliuretano (M6).

Figura 6.15.- Valores de la repetibilidad obtenida con la probeta donde se combinan la chapa de acero (M5) con la probeta de poliuretano (M6).

Figura 6.16.- Valores de la repetibilidad y su validación en la medida de la intensidad acústica incidente sobre las probetas.

Figura 6.17.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de polietileno (M1).

Figura 6.18.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de caucho sintético (M2).

Figura 6.19.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de lana de roca (M3).

Figura 6.20.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de lana de roca revestida con velo mineral (M4).

Figura 6.21.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de chapa de acero (M5).

Figura 6.22.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de poliuretano (M6).

Figura 6.23.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta combinada de chapa de acero (M5) y poliuretano (M6).

Figura 6.24.- Índice presión-intensidad calculado para la energía emitida por la fuente sonora.

Figura 6.25.- Valores de intensidad obtenidos con la sonda orientada normalmente e invertida.

Figura 6.26.- La intensidad acústica incidente sobre las probetas es representada por la línea negra. La intensidad acústica transmitida para cada probeta se representa con líneas de color.

Figura 6.27.- Resultados del Índice de Reducción Sonora (R) para cada uno de los materiales ensayados. La probeta de acero (M5) es la que tiene mejor comportamiento. De los materiales ligeros, el material que mejor se comporta es la lana de roca (M3 y M4).

Figura 6.28.- Índice de Reducción Sonora (R) obtenido para los materiales empleados en la construcción de la estructura de ensayo, chapa de acero (M5) de 6 milímetros de espesor con una superficie adherida de poliuretano base poliéster (M6) por la cara interior.

Figura 6.29.- Resultados del ensayo de linealidad para distintos tipos de punteras con el martillo diseñado para excitar la probeta de acero (M5).

Figura 6.30.- Espectros de vibración, intensidad sonora y Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) obtenidos en el ensayo modal de la probeta de acero (M5) para todo el ancho de banda.

Figura 6.31.- Espectros de vibración, intensidad sonora y Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) obtenido en el ensayo modal de la probeta de acero (M5) para el intervalo de frecuencia comprendido entre 100 Hz y 1600 Hz.

Figura 6.32.- El intervalo de frecuencia donde fluye mayor cantidad de energía acústica en el ensayo de la probeta de acero, es el comprendido entre los 100 Hz y los 250 Hz. En este intervalo se encuentran los primeros modos a flexión de la chapa de acero.

Figura 6.33.- Elementos que componen el modelo introducido en AUTOSEA2.

Figura 6.34.- Representación gráfica de la propagación del flujo de energía desde la fuente sonora hasta los distintos elementos que constituyen el modelo definido en AUTOSEA2.

Figura 6.35- Termograma de energía obtenido para el modelo a la frecuencia de 160 Hz.

Figura 6.36- Espectro de la energía modal de la probeta de acero (M5) en tercios de octava.

Figura 6.37- Espectro de vibración de la probeta de acero (M5) en tercios de octava.

Figura 6.38- Espectro de presión sonora en tercios de octava estimado por AUTOSEA2 para la probeta de acero (M5).

Figura 6.39- Comparativa entre los niveles sonoros estimados por AUTOSEA2 y los medidos por medio de la sonda de intensidad sonora de la marca comercial B&K para la probeta de chapa de acero (M5).

Figura 6.40- Comparativa entre los niveles sonoros estimados por AUTOSEA2 y los medidos por medio de la sonda de intensidad sonora de la marca comercial B&K, para una probeta combinada de chapa de acero (M5) y poliuretano (M6).

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Expresiones y niveles de referencia de las magnitudes utilizadas en acústica.

Tabla 4.1.- Error de proximidad en función de la longitud del espaciador y según el tipo de fuente.

Tabla 4.2.- Distancia de separación mínima utilizando separadores de 12 mm y 50 mm.

Tabla 4.3. Valores máximos de las desviaciones típicas de reproducibilidad según UNE EN ISO 9614-3.

Tabla 4.4. Acciones a adoptar para incrementar la precisión en la medida de la intensidad.

Tabla 5.1.- Tipos de probetas ensayadas y características principales.

Tabla 6.1.- Frecuencias naturales relevantes en el intervalo de 100 Hz a 3150 Hz.

NOMENCLATURA

A	Absorción sonora de una sala en metros cuadrados
B	Ancho de banda en Hz
c	Velocidad de propagación del sonido en el aire
d	Distancia de separación de los micrófonos
dA	Diferencial de área
dEr	Diferencial de energía en la dirección r
dr	Diferencial de longitud en la dirección r
dS	Diferencial de superficie
dt	Diferencial de tiempo
E	Esperanza matemática
Ei	Energía vibracional del subsistema i
f	Frecuencia en Hz
$F_{p/In}$	Indicador presión-intensidad según ISO 9614-3, se corresponde con el índice de reactividad o índice presión-intensidad L_K
Fr	Fuerza resultante
FS	Indicador de no uniformidad espacial del campo sonoro y definido según ISO 9614-3
FT	Indicador de variabilidad temporal definido según ISO 9614-3

G_{AB}	Espectro cruzado representado en términos “positivos” de frecuencia, su valor se corresponde con el doble de S_{AB}
G_{pu}	Espectro cruzado representado en términos “positivos” de frecuencia, su valor se corresponde con el doble de S_{pu}
G_{uu}	Autoespectro de la señal de la velocidad de las partículas del aire
\vec{I}	Vector de la intensidad sonora
I	Intensidad sonora real, representa la intensidad sonora que mediría un equipo ideal
Im	Parte imaginaria de una función compleja
I_{in}	Intensidad sonora incidente
I_{tr}	Intensidad sonora transmitida
I_n	Intensidad sonora promediada en todas las series de medida y definida según ISO 9614-3
\bar{I}_n	Intensidad sonora promediada temporalmente y espacialmente para todos los segmentos, definida según ISO 9614-3
I_{n1}	Intensidad sonora obtenida en el primer barrido
I_{n2}	Intensidad sonora obtenida en el segundo barrido
\bar{I}_{nj}	Intensidad sonora promediada temporalmente en cada segmento de una superficie parcial y definida según ISO 9614-3
I_{nq}	Intensidad sonora instantánea definida según ISO 9614-3
I_{nm}	Intensidad sonora promediada y definida según ISO 9614-3
I_r	Intensidad sonora medida en la dirección r
\hat{I}_r	Estimador de la intensidad sonora en la dirección r
I_0	Intensidad de referencia, se obtiene a partir del nivel de presión sonora, su valor es de 10^{-12} w/m ²
I_θ	Intensidad sonora medida por una sonda girada θ grados con respecto a la dirección del flujo de energía

\hat{I}_θ	Estimador de la intensidad sonora medida por una sonda girada θ grados con respecto a la dirección del flujo de energía
$ \bar{I}_n _j$	Intensidad sonora promediada en el tiempo y medida en cada uno de los segmento de una superficie parcial, definida según ISO 9614-3
I_x	Intensidad sonora medida en un campo reverberante
k	Número de onda de un fenómeno vibratorio
K	Índice de reactividad, representa la relación entre la diferencia de fase entre dos puntos en el espacio donde se propaga una onda sonora y la fase medida por un equipo concreto
L_d	Índice de capacidad dinámica, representa el margen en decibelios del índice de reactividad o índice presión-intensidad que no debe ser sobrepasado para garantizar una precisión determinada
L_K	Nivel en decibelios del índice de reactividad o índice presión-intensidad
$L_{K,0}$	Nivel del índice de intensidad residual, representa la diferencia entre el nivel de intensidad residual $L_{L,R}$ y el nivel de presión residual $L_{p,R}$
L_I	Nivel de intensidad sonora expresado en decibelios y con una intensidad de referencia de 10^{-12} w/m ²
$\bar{L}_{ In }$	Nivel de intensidad sonora en valor absoluto, que ha sido promediada temporalmente y espacialmente, definida según ISO 9614-3
$L_{L,R}$	Nivel de intensidad residual, representa la intensidad medida por un equipo concreto cuando se le aplica la misma señal a ambos micrófonos
L_p	Nivel de presión sonora expresado en decibelios y con una presión de referencia de $20 \cdot 10^{-6}$ Pa
\bar{L}_p	Nivel de presión sonora promediado temporal y espacialmente
$L_{p,R}$	Nivel de presión residual, representa la presión medida por un equipo concreto durante la obtención del nivel de intensidad residual.
L_w	Nivel de potencia sonora expresado en decibelios y con una potencia de referencia de 10^{-12} w

L_ε	Error en decibelios motivado por causas diversas durante la medida
m	Masa de un subsistema
M	Número de series de medida
$M(\omega)$	Solapamiento modal
$n(\omega)$	Densidad modal
N	Número de segmentos de medida
N_s	Número de segmentos comprendidos en la superficie parcial
p	Presión sonora
\bar{p}	Presión sonora promediada
$p(t)$	Presión sonora como función del tiempo
$p(r,t)$	Presión sonora como función del tiempo y del espacio
P_1	Presión sonora medida en el punto 1
P_2	Presión sonora medida en el punto 2
p_a	Presión atmosférica
p_A	Presión sonora medida por el micrófono A de la sonda
p_B	Presión sonora medida por el micrófono B de la sonda
\bar{p}_j	Presión sonora promediada en el tiempo para cada segmento
p_o	Módulo de la presión sonora
P_m	Presión sonora promediada y definida según ISO 9614-3
$P(f)$	Transformada de Fourier de la presión sonora
$P_{i,in}$	Flujo de energía de entrada a un subsistema i
$P_{i,dis}$	Flujo de energía disipada por un subsistema i
P_{ij}	Flujo neto de energía entre dos subsistemas
P_q	Presión sonora instantánea definida según ISO 9614-3
P_0	Presión de referencia, representa el umbral de audición, su valor es de $20 \cdot 10^{-6}$ Pa
p_{RMS}	Presión sonora en valor eficaz

p_t	Presión absoluta en un punto del espacio
Q_1	Velocidad volumétrica en el punto 1 de una fuente monopolar
Q_2	Velocidad volumétrica en el punto 2 de una fuente monopolar
Re	Parte real de una función compleja
r	Dirección de medida
r_i	Distancia de la fuente al punto donde tiene lugar la medida
R	Índice de reducción sonora
R_{pu}	Correlación cruzada entre la señal de presión sonora y la señal de la velocidad de las partículas del aire
s	Desviación típica
S	Superficie barrida en m ²
S_{AB}	Espectro cruzado de las dos señales de los micrófonos de una sonda de intensidad sonora
S_{pu}	Espectro cruzado entre la señal de presión sonora y la señal de la velocidad de las partículas del aire
t	Tiempo
T	Periodo, tiempo
$T_{Fr < 0.6}$	Tiempo de variabilidad temporal de referencia para determinar el tiempo de muestreo y definido según ISO 9614-3
T_r	Tiempo de reverberación, representa el tiempo transcurrido para una caída de 60 decibelios en una sala
T_s	Tiempo de barrido teórico, según lo define la norma ISO 9614-3
T'_s	Tiempo de barrido real, según lo define la norma ISO 9614-3
u_r	Velocidad de las partículas del aire en la dirección r
\hat{u}_r	Estimador de la velocidad de las partículas del aire en la dirección r
$u_r(t)$	Velocidad de las partículas del aire como función del tiempo
$u(r,t)$	Velocidad de las partículas como función del tiempo y del espacio
\vec{u}	Vector velocidad de las partículas del aire

u_0	Módulo de la velocidad de las partículas del aire
\hat{u}_r	Estimador de la velocidad de las partículas en la dirección r
u_{RMS}	Velocidad de las partículas en valor eficaz
u_x	Componente de la velocidad de las partículas en la dirección x
u_y	Componente de la velocidad de las partículas en la dirección y
u_z	Componente de la velocidad de las partículas en la dirección z
$U(f)$	Transformada de Fourier de la velocidad de las partículas del aire
v_i	Valor promedio de la vibración del subsistema i
v_n	Velocidad de vibración normal a la superficie
V	Volumen del recinto de ensayo, necesario para la determinación del tiempo de reverberación
W	Potencia sonora, energía por unidad de superficie y tiempo que posee una fuente sonora
W_0	Potencia de referencia, su valor es de 10^{-12} w
W_{in}	Potencia acústica incidente
W_{tr}	Potencia acústica transmitida
Z	Impedancia del medio de propagación
Z_s	Impedancia específica del medio
Δr	Distancia separadora de los micrófonos, representa la longitud del espaciador
$\Delta r'$	Distancia efectiva de separación de los micrófonos
Δx	Dimensión según el eje x de un segmento básico
Δy	Dimensión según el eje y de un segmento básico
δ_{pI}	Nivel en decibelios del índice de reactividad, también llamado índice presión-intensidad que se representa como L_K .
δ_{pI_0}	Nivel del índice de intensidad residual, representa la diferencia entre el nivel de intensidad residual $L_{I,R}$ y el nivel de presión residual $L_{p,R}$, también se representa como $L_{K,0}$.

$\mathcal{E}_{aleatorio}$	Error aleatorio
ϕ	Diferencia de fase de la onda de presión sonora en dos puntos próximos en el espacio
ϕ_{AB}	Diferencia de fase medida entre los micrófonos A y B de la sonda
ϕ_1	Fase medida por el microfono situado en el punto 1
ϕ_2	Fase medida por el microfono situado en el punto 2
φ	Desfase entre los canales de medida del equipo
γ^2	Función de coherencia entre señales
η	Factor de pérdida por amortiguamiento
η_{ij}	Factor de pérdida de acoplamiento
λ	Longitud de onda en metros, distancia recorrida por la onda sonora durante el transcurso de un ciclo
θ	Ángulo formado entre la dirección del flujo de energía generado por una fuente sonora y la dirección de orientación de la sonda de intensidad
ρ	Densidad del aire
τ	Tiempo arbitrario para obtener la correlación cruzada
ω	Frecuencia circular en rad/s
$\partial p / \partial r$	Gradiente de la onda de presión sonora en la dirección r en dos puntos próximos en el espacio
$\partial \phi / \partial r$	Diferencia de fase de la onda sonora entre dos puntos próximos en el espacio
Φ	Fase real obtenida por un equipo de medida, es la suma de, $\phi + \varphi$.
$\partial \Phi / \partial r$	Gradiente de fase del campo sonoro determinado por un equipo de medida en la dirección r

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- Introducción

La determinación del Índice de Reducción Sonora (R) de un paramento vertical u horizontal en el ámbito de la edificación, está perfectamente normalizado tanto para medidas en laboratorio como in situ. Tradicionalmente, se han definido procedimientos de ensayo en laboratorio utilizando la medida de la presión sonora. La norma UNE EN ISO 140 parte 1 (1998) establece los requisitos que deben cumplir las instalaciones de los laboratorios de ensayo sin transmisiones indirectas. La norma UNE EN ISO 140 parte 3 (2000) establece los procedimientos de ensayo para la determinación del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción en laboratorio. Ambas normas se basan en la medida de la presión sonora como se ha mencionado.

La consolidación de la medida directa de la intensidad acústica utilizando una sonda constituida por dos micrófonos pareados, permitió la normalización de las medidas de aislamiento de los elementos de construcción en laboratorio mediante el procedimiento establecido en la norma ISO 15186 parte 1 (2000). Los requisitos de las instalaciones de ensayo son menos restrictivos que los establecidos para la medida de la presión sonora.

En cualquier caso, es necesario disponer de un laboratorio de ensayo constituido por una sala emisora y otra receptora. Además, se cuenta con el

inconveniente de que los procedimientos de ensayo están pensados para determinar el aislamiento acústico de los elementos, o mejor aún, de los distintos sistemas constructivos empleados en la edificación. De forma generalizada se ensayan paramentos verticales compuestos de varios materiales, como es el caso de los mamparos de puesta en obra en seco, compuestos generalmente por varias capas de cartón-yeso y material aislante interpuesto. También se ensayan sistemas constructivos de fábrica de ladrillo de hoja simple o doble, a los que se les suele adicionar algún tipo de material aislante, sobre todo en el caso de la doble hoja. Por lo tanto, en el ámbito de la edificación existen procedimientos de ensayo suficientes para caracterizar cualquier sistema constructivo, siendo posible obtener el Índice de Reducción Sonora (R) midiendo presión sonora o intensidad sonora. Sin embargo, en el ámbito industrial no existe un procedimiento de ensayo que caracterice los cerramientos y materiales más utilizados para la insonorización de máquinas, como es el caso de: los grupos electrógenos, los compresores, las plataformas elevadoras, etc. Los diseñadores de este tipo de máquinas necesitan conocer a priori el comportamiento como aislante de los materiales con los que trabajan. Sin embargo, los proveedores no aportan esta información fácilmente cuando se trata de materiales de densidad superficial baja, como es el caso de: la lana de roca, los polietilenos, los poliuretanos, el caucho sintético, etc.

Por lo tanto, parece obvio que existe una necesidad de establecer un procedimiento de ensayo sencillo que no necesite de laboratorios especializados con criterios restrictivos importantes; y a la vez, que sea lo suficientemente fiable para determinar el Índice de Reducción Sonora (R) de cualquier material ligero de uso industrial. Este nuevo procedimiento de ensayo tiene que permitir la validación de las medidas por medio de una norma y tener el grado de precisión de laboratorio, que está establecido en 0,5 dB. La única norma que cumple con los requisitos mencionados es la UNE EN ISO 9614 parte 3 (2002), siendo el parámetro de medida la intensidad sonora. Conocida la norma de referencia y la técnica de medida, el siguiente paso consiste en diseñar los recursos materiales necesarios para la realización de los ensayos, así como definir el procedimiento a seguir.

1.2.- Objetivos

Los principales objetivos que se pretende alcanzar con el desarrollo de la presente Tesis Doctoral son los siguientes:

1) Realizar un análisis teórico y experimental sobre la utilización de la intensimetría acústica como técnica de medida de aislamiento acústico y caracterización de materiales aislantes.

2) Diseñar un procedimiento de ensayo que permita obtener el Índice de Reducción Sonora (R) por medio de la medida directa de la intensidad acústica para materiales de baja densidad superficial y de uso industrial. Las medidas deben validarse según lo establecido en la norma UNE EN ISO 9614 parte 3, siendo importante que dichas medidas puedan realizarse de una sola vez en todo el ancho de banda, desde 100 Hz a 3150 Hz. Para ello, será necesario incorporar a la sonda de intensidad un separador de micrófonos de longitud específica y no comercial.

3) Diseñar y construir una estructura donde se pueda introducir una fuente sonora que permita el montaje de las probetas de diversos materiales. Se pretende que el campo sonoro creado en el interior de la estructura de ensayo incida sobre las probetas, permitiendo medir el nivel de energía acústica emitido por la fuente y el transmitido a través de éstas. Es importante que se consiga minimizar la contribución de energía acústica proveniente de cualquier dirección que no sea la normal a la superficie definida por el material objeto de ensayo.

4) Modelizar el comportamiento vibroacústico de la estructura de ensayo por medio del método de Análisis Estadístico de Energía (SEA), determinándose los flujos de transmisión de energía acústica y vibratoria a través de los elementos que conforman la estructura de ensayo. Los valores obtenidos deben verificar que la energía transmitida a través de la probeta es la componente principal en el punto de medida, siendo despreciables las contribuciones de energía acústica del resto de elementos que forman parte de la estructura de ensayo.

5) Comparar los resultados estimados por un modelo matemático, definido mediante un software comercial de Análisis Estadístico de Energía (SEA), y los valores medidos con una sonda de intensidad sonora.

6) Obtener y comparar la capacidad de aislamiento acústico de distintos materiales de uso industrial y de baja densidad superficial.

1.3.- Metodología

El Índice de Reducción Sonora (R), representa la relación entre la energía acústica incidente sobre una superficie W_{in} y la transmitida W_{tr} a través de ésta, expresándose su valor en decibelios.

$$R = 10 \log \frac{W_{in}}{W_{tr}}$$

La intensidad sonora es un vector perpendicular a la superficie de medida, representando su integración a través de dicha superficie, el flujo de energía acústica. Las distintas tecnologías existentes en el mercado para la medida de la intensidad sonora se basan en la determinación de la velocidad de las partículas del aire afectadas por la propagación de la onda acústica. El producto de la presión media p por la velocidad de las partículas del aire u , en un punto concreto del espacio, es la intensidad sonora.

$$\vec{I} = \bar{p} \times \vec{u}$$

El primer aspecto a considerar en la metodología de trabajo es la calibración de la fuente sonora ubicada en el interior de la estructura de ensayo, figura 1.1. Dicha fuente genera una onda sonora de banda ancha que incide directamente sobre cada probeta. Para fijar el volumen de la fuente se tienen en cuenta las dimensiones del recinto. A continuación, y sin montar probeta alguna, se barre la superficie por donde se radia la energía acústica mediante una sonda de intensidad sonora.

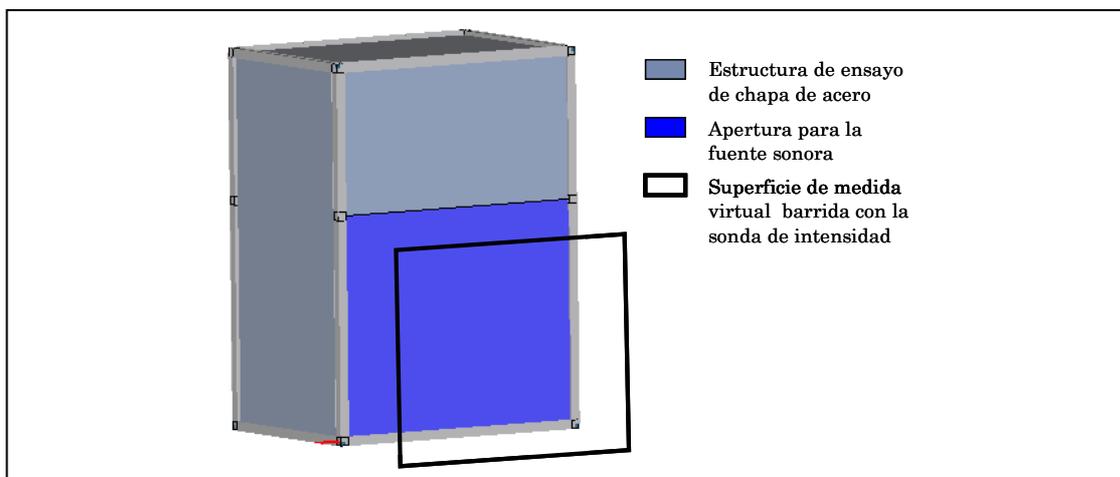


Figura 1.1.- Estructura de ensayo construida con angulares y forrada con chapa de acero de 6 mm de espesor. Las probetas se montan en la parte delantera cerrando la apertura para la fuente.

El espectro obtenido será el patrón de referencia para la energía incidente, quedando fijo el volumen de la fuente para todos los ensayos. Además, debe verificarse periódicamente que el volumen de la fuente no varía más del 1 %.

Una vez calibrado el nivel de energía incidente, se van montando en la estructura de ensayo las diversas probetas, midiéndose la energía acústica transmitida a través de ellas. Dado que la superficie barrida es la misma en todas las medidas, la diferencia entre el espectro de intensidad obtenido en la calibración de la fuente y cada uno de los espectros medidos con las probetas montadas, representa directamente el Índice de Reducción Sonora (R) de cada material. Es muy importante que cada medida se realice con un único procedimiento de barrido de la superficie, es decir, con un separador de micrófonos que abarque todo el ancho de banda de interés. Además, como las medidas de intensidad sonora tienen que ser validadas según lo establecido en la norma UNE EN ISO 9614 parte 3, es necesario obtener los indicadores normalizados para todas las medidas. Por lo tanto, debe valorarse: el error debido a la aproximación por diferencias finitas a frecuencias altas, el error originado por el desajuste de fase de los dos canales de medida de la sonda a frecuencias bajas y otros errores de menor importancia. Si se consigue la validación, se puede considerar que el campo sonoro generado en el punto de medida es poco reactivo y, por lo tanto, se está en condiciones equiparables a las de campo libre cuando se mide la presión sonora.

El siguiente paso es determinar el comportamiento de los elementos que constituyen la estructura de ensayo. Todos los cerramientos son de chapa de acero de 6 mm de espesor con un forrado de polietileno de baja densidad colocado por la cara interior. Para ello, se determina el aislamiento acústico de una probeta de similares características a la del resto de los elementos de la estructura. Así mismo, dicha probeta de chapa de acero ha sido sometida a un ensayo de análisis modal con la finalidad de obtener las frecuencias naturales presentes entre los 100 Hz y los 3150 Hz. La determinación del amortiguamiento a dichas frecuencias es necesaria para modelizar la estructura de ensayo con el software comercial AUTOSEA2 LT.

Por último, los valores obtenidos experimentalmente se comparan con los resultados estimados por el software comercial, comprobándose la eficiencia de cálculo de AUTOSEA2 LT. El método del Análisis Estadístico de Energía (SEA) posee una limitación de cálculo importante en la zona de las bajas frecuencias donde

el solapamiento modal es pequeño. Sin embargo, en medias y altas frecuencias, el ajuste se suele considerar aceptable ya que posee buena precisión y poco coste de procesado.

1.4.- Estructura y planteamiento

La presente Tesis Doctoral ha sido estructurada y desarrollada en los siguientes siete capítulos:

- ❖ **Capítulo 1.** Introducción y objetivos.
- ❖ **Capítulo 2.** El estado del arte
- ❖ **Capítulo 3.** Fundamentos de la medida de la intensidad sonora.
- ❖ **Capítulo 4.** Validación y precisión del método de barrido para la medida de la intensidad sonora.
- ❖ **Capítulo 5.** Recursos materiales y técnicos. Procedimientos de ensayo.
- ❖ **Capítulo 6.** Análisis y discusión de resultados.
- ❖ **Capítulo 7.** Conclusiones

En el Capítulo 1 quedan recogidos los objetivos iniciales, así como nuevos objetivos planteados durante del desarrollo de la Tesis. Igualmente, se comenta muy brevemente la metodología experimental utilizada y el procedimiento de estimación teórico basado en el Análisis Estadístico de Energía (SEA).

En el Capítulo 2 se mencionan algunos de los hechos históricos más relevantes relacionados con el estudio de la acústica en la antigüedad, los distintos acontecimientos que supusieron un hito importante en su desarrollo y, por último, la evolución reciente de la acústica en relación con la medida de la intensidad sonora. Se ha tenido en cuenta en este recorrido histórico, la importancia del Renacimiento como nuevo amanecer para la Ciencia. Pero, sobre todo, se ha valorado especialmente la contribución teórica de Lord Rayleigh como padre indudable de la acústica moderna, que se benefició del caldo de cultivo que supuso el espectacular desarrollo científico y técnico del siglo XIX. La parte final de este capítulo recoge los desarrollos del siglo XX relacionados con la medida del sonido en general y de la

intensidad sonora en particular. Se concluye con las líneas de trabajo relacionadas con la medida de la intensidad sonora que actualmente están en desarrollo a nivel mundial.

En el Capítulo 3 se definen todos los conceptos teóricos relacionados con la medida del flujo de energía acústica que atraviesa una superficie concreta. Se enumeran las propiedades de la intensidad sonora, su carácter vectorial, así como los aspectos vinculados a la reactividad del campo sonoro existente en el punto de medida. También se desarrolla la teoría básica de cada una de las tecnologías existentes actualmente en el mercado para la medida de la intensidad sonora.

En el Capítulo 4 se enumeran todos los errores de medida que pueden cometerse durante el proceso de obtención de la intensidad sonora. Se describe la naturaleza de cada uno de ellos, así como los aspectos a considerar para evitarlos o minimizarlos. También se muestra el procedimiento de medida por el método de barrido establecido en la norma UNE EN ISO 9614 parte 2 y parte 3. La mayor precisión en las medidas se obtiene aplicando los criterios establecidos en la parte 3 de la norma para los indicadores de campo. En la parte final del capítulo se han tabulado cada uno de los criterios a verificar durante el procedimiento de medida, aportándose además un esquema del proceso completo para validar el ensayo.

En el Capítulo 5 se describen las características de la estructura construida para la realización de los ensayos y el equipamiento utilizado, incluyendo la modificación realizada sobre la sonda de intensidad sonora, consistente en el diseño de un nuevo separador de micrófonos. Además, se indican las características de los materiales de las probetas ensayadas, la instrumentación utilizada en las medidas modales realizadas sobre una probeta de chapa de acero 6 milímetros y, finalmente, la modelización de la estructura de ensayo por medio de AUTOSEA2 LT a partir de los parámetros modales obtenidos. También se incluyen en este capítulo las características del martillo de excitación diseñado a partir de un sensor dinámico de fuerza.

En el Capítulo 6 se muestran los resultados más relevantes obtenidos en el desarrollo de la presente tesis. En primer lugar, los valores de repetibilidad de las medidas con la sonda de intensidad y el separador diseñado específicamente. En segundo lugar, los criterios de validación de las medidas establecidos en la norma UNE EN ISO 9614 parte 3. En tercer lugar, los valores del Índice de Reducción

Sonora (R) de los materiales objeto de ensayo y, por último, los resultados estimados por AUTOSEA2 LT. Además, se ha discutido ampliamente de forma secuencial cada uno de los resultados obtenidos, comparándose los valores de aislamiento acústico medidos para la probeta de chapa de acero con los estimados por el software comercial.

Finalmente, en el Capítulo 7 se aportan las conclusiones generales y específicas derivadas del análisis de resultados, así como las posibles líneas futuras de desarrollo.

Capítulo 2

EL ESTADO DEL ARTE

2.1.- Introducción

La acústica es una disciplina científica que ha adquirido personalidad propia en los últimos 150 años. No obstante, en la antigüedad todo lo relacionado con el sonido poseía un carácter mágico que suscitaba el interés de los grandes pensadores griegos y romanos. El afán por mejorar la acústica de los recintos teatrales motivó el estudio de la transmisión del sonido. La distinción entre los términos sonido y ruido es palpable en algunas obras clásicas de autores romanos como Vitrubio o Séneca. En la segunda mitad del siglo XIX, la acústica adquirió la entidad suficiente para que un número excepcional de grandes científicos e inventores, en cuanto a cantidad y calidad, se interesaran por esta disciplina científica. Hasta nuestros días el avance ha sido vertiginoso, se puede afirmar que la acústica es una materia que se enseña en muchas universidades como un todo y no como una parte de otras parcelas del saber.

Con la revolución industrial comienza la escalada de la faceta más negativa del sonido, es decir, el ruido. Los conocimientos adquiridos en acústica permiten luchar contra este contaminante, ayudando al ser humano a vivir en un mundo menos ruidoso y más confortable durante su trabajo y su tiempo libre. En la actualidad son muchas las áreas del conocimiento que se ven afectadas por el desarrollo de la acústica: la medicina, la arquitectura, y por supuesto, la ingeniería en todas sus facetas.

2.2.- Antecedentes históricos en la Antigüedad

Resulta fácil imaginar, que la capacidad humana para percibir sonidos ha sido clave en el desarrollo de la especie. Desde los tiempos más remotos el hombre ha sido capaz de comunicarse con señales sonoras rudimentarias, y más tarde, con un lenguaje perfectamente estructurado. Los sonidos no solo contienen información que condiciona el comportamiento del ser humano, sino que también le puede producir sensaciones placenteras o incómodas. La unión perfectamente armonizada de los sonidos, es decir la música, fue muy probablemente el origen técnico del estudio del sonido. Quizás el primer instrumento musical fue utilizado en la prehistoria cuando nuestros antepasados golpeaban los troncos con palos para comunicarse, cazar, defenderse de las fieras, o quizás incluso, como forma de expresar su estado de ánimo. Civilizaciones como la egipcia, la china y la india, hace ya 3000 años fabricaban instrumentos musicales, siendo capaces de establecer una serie de reglas para hacer música correctamente. El interés de la humanidad por la música ha sido siempre una correa de transmisión para que científicos e ingenieros aumentaran sus conocimientos de acústica.

La acústica, del griego *akoustika*, es estudiada con parámetros científicos en el momento que los sabios de la Antigua Grecia se interesaron en describir y explicar los fenómenos de la naturaleza relacionados con el sonido. Se cree que Tales de Mileto (640-546 a.C.) fue el primer precursor del método científico.

El estudio de la acústica adquiere gran relevancia al aplicarse a la construcción de los teatros griegos como el de Epidauro. El interés por el conocimiento de las leyes que rigen los fenómenos asociados con el sonido se inicia casi con toda seguridad con Pitágoras (570-497 a.C.). En el siglo VI a.C., Pitágoras de Samos y sus discípulos, observaron que el ruido de los martillos al golpear un yunque variaba de tono en función de la masa del martillo. Se descubre de esta forma la frecuencia natural de los cuerpos, siendo capaces de obtener frecuencias naturales más o menos agudas simplemente modificando la masa de los objetos. No es menos importante el aporte filosófico, y sobre todo experimental, de la física desarrollada por los Pitagóricos. También estudiaron la variación de las frecuencias naturales de la vibración de las cuerdas tensas, estableciendo las razones numéricas entre distintos tonos. Curiosamente, y según parece ser, Herodoto (484-425 a.C.) diseñó un tosco transductor de vibración. Aristófanes (450-380 a.C.) construyó el

primer oscilador diseñado con tal fin. Platón (429-347 a.C.), siendo uno de los filósofos de mayor importancia de la antigüedad, apenas aportó nada que permitiera avanzar en el conocimiento de la acústica, tan solo sus escritos sobre la *Vibración Simpática*. No podemos decir lo mismo de su principal discípulo, Aristóteles (384-322 a.C.), que con su *Leyes del Movimiento* y *Libro sobre Acústica* estudió el fenómeno natural del eco, explicando que se debía a la reflexión del sonido.

Posteriormente, Euclides (350-275 a.C.), utilizó un péndulo como medidor de vibraciones. Simultáneamente, su contemporáneo Alejandro de Afrodísias, aportó sus estudios sobre la energía cinética y la energía potencial. También es importante el aporte de Arquímedes (287-212 a.C.), que estableció los fundamentos de la Acústica Geométrica ligados a los fenómenos ópticos, postulando el principio del llamado “inverso del cuadrado de la distancia para la intensidad acústica y lumínica”. Herón de Alejandría llegó a la conclusión que los sonidos son vibraciones longitudinales que se propagan a través del aire. También aseguró que el ángulo de incidencia al chocar el sonido contra un sólido era igual al ángulo de reflexión.

En la Antigua Grecia, así como en Roma, existía una gran preocupación por perfeccionar la proyección de las voces de los actores en los teatros construidos al aire libre. Con seguridad la mayor parte de los teatros antiguos tenían una acústica mediocre, solo unos pocos alcanzaron fama por la calidad acústica del edificio, como en Epidauro donde el asiento más alejado se encontraba a 70 metros del escenario y la inteligibilidad en ese punto era sorprendentemente buena, figura 2.1.

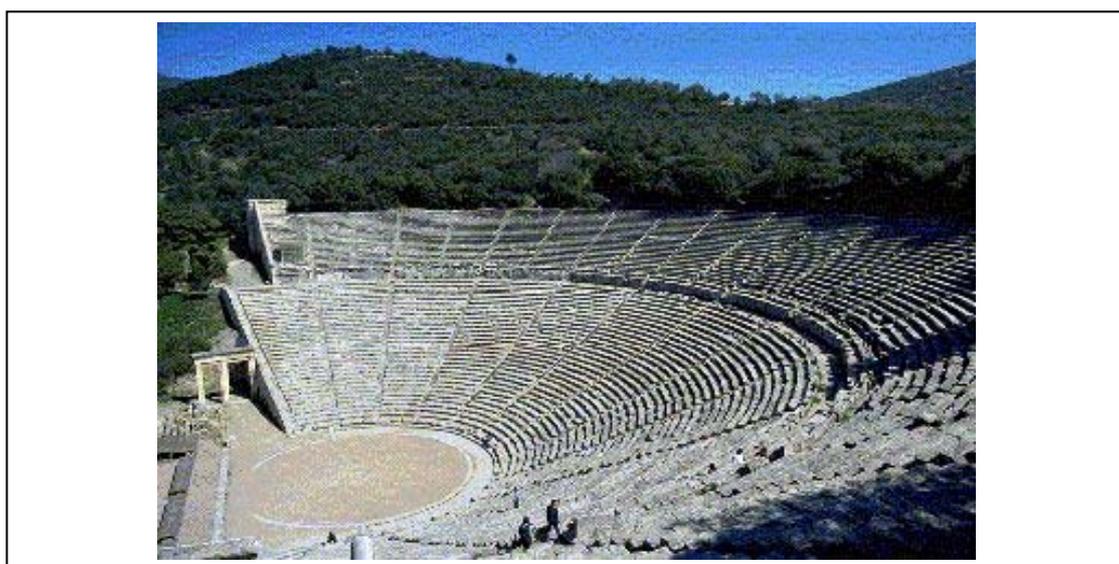


Figura 2.1. - Teatro de Epidauro construido en la Antigua Grecia en el año IV a.C.

La distribución del sonido desde el escenario al graderío fue objeto de estudio por parte de los romanos Lucrecio y Vitrubio (25 a.C.), valga como ejemplo la técnica recomendada por Vitrubio, consistente en distribuir estratégicamente entre el público vasos de resonancia. Los sabios romanos a diferencia de los griegos, estudiaban los fenómenos relacionados con el sonido con una visión más pragmática, es decir, más “ingenieril”. Mientras que los griegos fueron mucho más amantes de conocer las leyes que rigen la naturaleza. En la obra de Vitrubio, *De Architectura* Libro V, se puede leer:

“El techo del pórtico del teatro, que ha de estar sobre el graderío más alto debe llegar a nivel de la altura del escenario, porque de este modo la voz, al ascender, alcanzará el mismo nivel en lo más alto del graderío que en el techo del escenario; pues si no existiera esta igualdad, la voz se extinguiría al nivel que hubiera llegado primeramente”.

Vitrubio clasificó los sonidos cuando impactan contra un sólido como: circusonantes, resonantes y consonantes. Los *circusonantes* decía que, “eran en los cuales la voz se mueve en todas direcciones y luego vuelve hacia el centro, donde se disuelve, haciendo confusos los finales de las frases, y se mueren en sonidos sin sentido”. Los *resonantes* eran “los que golpean contra los sólidos dando lugar a ecos y hacen que las palabras se oigan repetidas”. Y por último, *los consonantes* “donde la voz se ve reforzada en todas sus características, y ésta alcanza los oídos de los espectadores clara y distinta”. Apréciase que en la definición de los sonidos circusonantes parece intuirse que existe una composición de dos sonidos que pueden llegar a producir el silencio, es decir, la anulación de un sonido con su antagónico desfasado 180 grados. Parece ser que W.C. Sabine fue quien, siglos después, valoró este detalle como sorprendente. Vitrubio también estableció criterios para el correcto ajuste de armas militares como las catapultas, basándose en el sonido acústico de los tirantes de cuerda trenzada cuando eran tensados.

Lucrecio escribió textos donde se intenta definir conceptos, tales como: reverberación, difracción del sonido, transmisión y aislamiento del sonido.

“Cuando el espacio a recorrer no es muy grande, la voz va desde el principio al fin de cada palabra y éstas pueden ser oídas con distinción, pero si el camino se hace más largo de lo adecuado, aparece

la confusión, las palabras se escuchan sin que exista entendimiento, esa confusión es la voz cuando llega, demasiado estorbada.

Una voz se dispersa repentinamente en varias voces, algunas golpean en la lejanía el aire sin efecto alguno, otras se estrellan contra los cuerpos sólidos y entonces retornan, con la imagen engañosa de una palabra.

En los lugares solitarios, las grandes paredes de roca nos devuelven las palabras, así abofetean colina tras colina y se repite la reverberación. La distribución de voces se asemeja a una chispa de fuego que a menudo golpea al propio fuego que la produjo y arde de nuevo. Por lo tanto, el espacio se llena de voces completamente, todo alrededor bulle y se excita con el sonido.

Todas las imágenes luminosas siguen un camino recto hacia delante una vez que se producen; aunque ninguno puede verlas si se sitúa detrás de una pared, en cambio si que podrá oír las voces a través de ella. Pero aún cuando la voz sea capaz de superar la pared de una casa y penetrar en el oído, está embotada y confusa, y nos parece escuchar sonidos en vez de palabras.”

Mientras que Lucio A. Séneca (4 a.C.-65 d.C.) añadiría que dicha propagación era posible por la naturaleza elástica del aire. Este ilustre cordobés enfatizó sobre otro aspecto controvertido del sonido, aquel que puede ser definido como molesto, es decir, el ruido. La ciudad de Roma debió ser tremendamente ruidosa, hasta el punto de quedar reflejado en un número considerable de textos históricos. En una ciudad bulliciosa tenían lugar un gran número de oficios que perturbaban el descanso de los pensadores de la época. Incluso el ruido de los carros y la multitud fue objeto de crítica tanto en textos de Séneca como de Vitrubio. En el texto siguiente de Séneca, epístola LVI a Lucilio, se puede intuir la resignación del pensador frente al ruido.

“Creo que la voz humana distrae más que el rumor, porque aquella reclama la atención del espíritu, mientras que el rumor no llena ni hiere más que a los oídos. Entre los ruidos que suenan a mí alrededor sin distraerme pongo los carros que pasan por la calle, mi vecino el serrador, y aquel otro que cerca de la fuente ensaya las trompetas y

flautas que más que cantar, aúlla. Pues ¿qué? ¿No será alguna vez más cómodo estar libre de todo tumulto?. Estoy seguro, por eso me iré de este lugar. Intenté probarme y ejercitarme. ¿Qué necesidad de torturarse más tiempo, si Ulises encontró tan fácilmente para sus compañeros el remedio adecuado contra las sirenas?”.

Existe un periodo importante, que se extiende desde el final del imperio romano hasta el siglo XVI, donde los avances científicos relacionados con la acústica resultaron baldíos. Tan sólo en el siglo XI, Claudio Ptolomeo, recopiló en su texto *Armónicos* todos los conocimientos relacionado con la acústica y explicó que los sonidos se producían como consecuencia de los choques y del rápido movimiento vibratorio de las partículas. Durante este periodo de tiempo solamente avanzaría todo lo relacionado con la música, fundamentalmente sacra. No cabe duda, que el saber científico y el arte en todas sus facetas, quedaron relegados a un segundo término frente a la defensa del dogma religioso imperante en Europa.

2.3.- El Renacimiento, el nuevo amanecer para la Ciencia

El resurgimiento del interés por el saber científico tiene lugar en el periodo definido como Renacimiento, siglo XVII. Será Leonardo da Vinci quien con su estudios de anatomía, sus ingenios mecánicos y sus acertadas conclusiones sobre la dinámica del sólido, iniciaría el camino más floreciente del ser humano, donde arte y ciencia serán impulsados de forma espectacular. En el campo de la acústica, Leonardo da Vinci, llegó a definir de forma implícita el principio de superposición, que es el pilar básico de todos los fenómenos ondulatorios en medios lineales no dispersivos.

“En las dos instancias se cumple la misma ley de la Mecánica!. Tal como las ondas en el agua provocadas por la caída de una piedra, así se comportan las ondas del sonido al viajar por el aire, cruzándose unas con otras sin mezclarse, y preservando su centro respectivamente como origen de cada sonido...Por lo tanto, solo existe una ley de la Mecánica para todas las manifestaciones de la fuerza”.

Apréciase que el concepto de fase también se encuentra definido en el texto de una forma muy intuitiva, al expresar que cada onda de sonido preserva su centro como origen. De sus observaciones sobre el eco concluyó que el sonido debe tener una

velocidad finita. Leonardo da Vinci, también observó en 1490 que el sonido se propagaba a través del agua, “*si detiene su barco y coloca la punta de un tubo de gran longitud en el agua, y el otro extremo lo acerca a su oído, podrá escuchar barcos que se encuentren a gran distancia*”. Igualmente descubre la resonancia para cuerpos afinados en la misma nota, anticipándose a Galileo.

Galileo Galilei (1564-1642), impulsaría nuevamente el desarrollo de las disciplinas relacionadas con la acústica, siendo capaz de establecer los parámetros de los cuales depende la frecuencia de oscilación del péndulo. También estableció los parámetros que rigen el movimiento vibratorio de una cuerda. Concluyendo que la frecuencia de los sonidos depende de la masa del cuerpo vibrante, de su longitud y de la tensión a la que está sometido. Afirmó además, que las cuerdas pueden vibrar por resonancia. El abad francés Pierre Gasseus observó que la velocidad de propagación de los sonidos es constante e independiente de la amplitud y la frecuencia. Otro religioso, contemporáneo suyo y estudioso de Galileo, Marín Mersané (1588-1648), determinó las frecuencias de las notas musicales y las propiedades de los tubos sonoros.

En la segunda mitad del siglo XVII, la comunidad científica acepta el carácter ondulatorio del sonido. Isaac Newton (1642-1727), figura 2.2, establece las leyes del movimiento de la mecánica. En relación con la acústica, calcula la velocidad del sonido en función de la densidad y otros parámetros del medio en el que se produce la propagación del sonido, publicando en 1687 la primera teoría matemática relacionada con el tema.

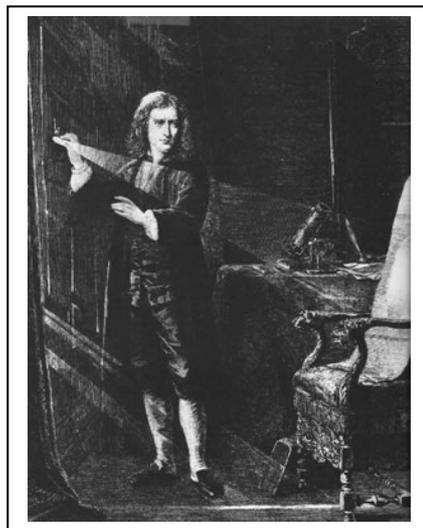


Figura 2.2. - Isaac Newton estudiando la naturaleza de la luz.

La acústica como disciplina avanza muy lentamente durante el siglo XVIII. La causa quizás se deba a su carácter de ciencia frontera relacionada con varias materias del saber científico. En la obra publicada en 1954 por el ilustre profesor de Harvard Frederick Vinton Hunt (1905-1972), *Origins in Acoustics*, se puntualiza sobre esta naturaleza multidisciplinar de la acústica.

“Hablar de acústica es situarse justo en medio de un cruce de caminos, de tal forma que la acústica produce sus frutos más sabrosos cuando se le observa como una síntesis de otras disciplinas clásicas, mucho más que cuando se le estudia aislada contextualmente.

Se puede justificar este comportamiento en el propio modelo histórico que ha seguido. Sus orígenes en cualquier estadio de su desarrollo no pueden encontrarse la mayoría de las veces, sino más bien en los hitos históricos antecedentes de las matemáticas, la mecánica, el calor y un puñado de otras disciplinas que toman parte, de forma simbiótica, en el intercambio intelectual con la acústica moderna”.

El único invento reseñable en el siglo XVIII relacionado indirectamente con la acústica es el descubrimiento del condensador eléctrico, figura 2.3, la conocida botella de Leyden, que recibe el nombre de la Universidad donde fue desarrollada por Pieter van Musschenbroeck (1692-1761). La botella de Leyden fue el primer acumulador de energía eléctrica que se le atribuye también a E. G. von Kleist.

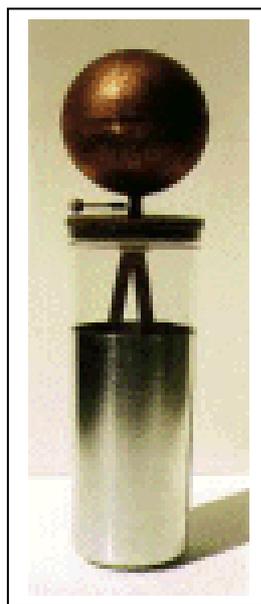


Figura 2.3.- Botella de Leyden, primer condensador eléctrico.

2.4.- El siglo XIX, la época dorada para los grandes inventores

En 1807, Young, registró las vibraciones a través de sólidos, así como a través de cuerdas vibrantes, estableciendo el principio de funcionamiento del posterior fonógrafo. Los científicos ya eran capaces de medir la velocidad de propagación del sonido en sólidos, y por supuesto en el aire desde mediados del siglo XVII, faltaba determinar la velocidad del sonido en el agua. En 1826, un físico suizo D. Colladon y un matemático francés C. Sturm, midieron de forma precisa su velocidad con un artilugio muy curioso basado en una idea de Leonardo da Vinci. Sturm sobre una barca hizo sonar una campana sumergida y Colladon, sobre otra barca, utilizó un tubo sumergido y un cronómetro para registrar el tiempo que el sonido tardaba en cruzar un lago, figura 2.4. El resultado fue de 1430 metros por segundo, solo algunos metros por segundo menos que el valor aceptado actualmente. Lo más importante de este descubrimiento fue determinar las excelentes condiciones que posee el medio acuático para transmitir las ondas sonoras, cinco veces más rápido que en el aire.

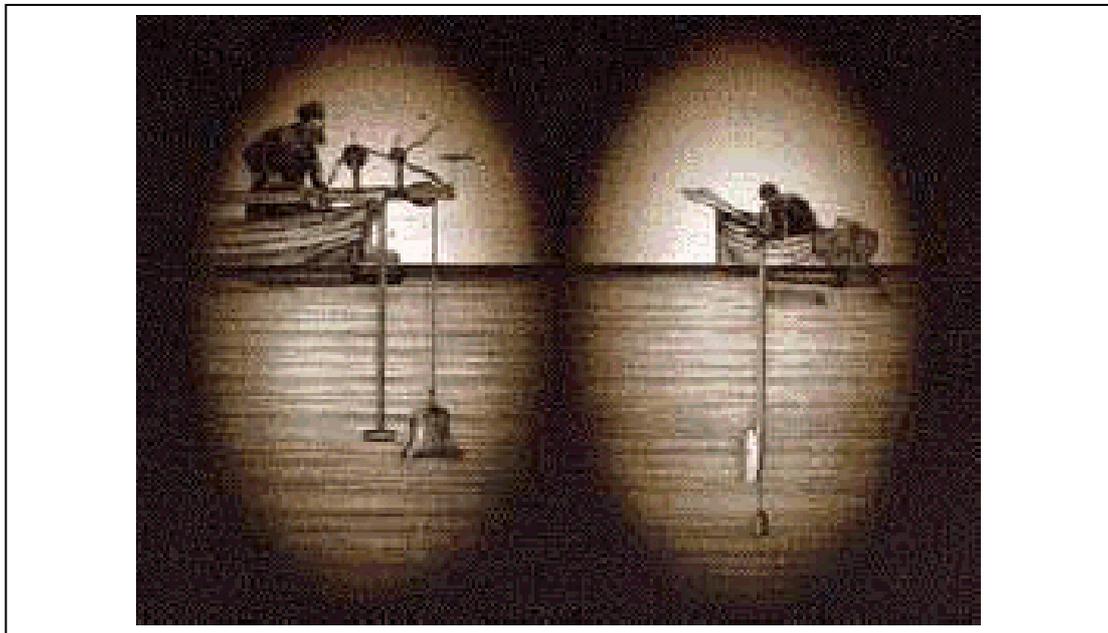


Figura 2.4.- Sturm y Colladon midiendo por primera vez de forma precisa en un lago la velocidad del sonido en el agua.

Los grandes avances científicos han coincidido en periodos muy concretos, donde un conjunto de grandes científicos han sido capaces de apoyarse o rivalizar por alcanzar un descubrimiento en primer lugar. Probablemente, no existe un periodo de

tanto éxito para la Ciencia como el siglo XIX. El número de grandes figuras científicas es importantísimo, pero mucho mayor es la prolija cantidad de inventos acontecidos durante todo este siglo. Resulta difícil elaborar una relación de todos los inventores que contribuyeron de forma importante al desarrollo de la acústica sin dejar de mencionar a alguno de ellos.

El físico británico Sir Charles Wheatstone (1802-1875), basándose en los principios del electromagnetismo y en compañía de W. Cooke, patentó en 1837 el telégrafo. La importancia de la figura de Wheatstone radica en que su formación comienza con el estudio de las vibraciones y sonidos básicos. Su telégrafo era una aplicación del telégrafo de Ampere de 1820, alimentado por una batería de Volta. El primer prototipo resultó ser muy complejo ya que se utilizaban tantos cables como letras tenía el alfabeto. Simultáneamente, Samuel F. B. Morse hizo lo mismo en América, la diferencia esencial era el lenguaje estándar que utilizaba el telégrafo Morse que mejoraba enormemente el telégrafo patentado por Wheatstone.

El ingeniero e industrial alemán Ernst Werner von Siemens (1816-1892), mejoró el telégrafo introduciendo una aguja para puntear las letras correctamente, pero siempre bajo el código Morse. Su patente más interesante, relacionada con el desarrollo de la acústica, fue denominada en Alemania en 1877 por el propio Siemens como un transductor electromecánico. Con posterioridad sería adaptada y mejorada por A. L. Thuras y E. C. Wente durante la década comprendida entre 1920 y 1930 para la empresa Bell System, dando origen al invento del altavoz.

Otro gran físico y médico alemán va a contribuir decisivamente al desarrollo de la acústica, se trata de Hermann Ludwing Ferdinand von Helmholtz (1821-1894). En 1911 se publicó en la *Británica* que, *“su vida desde el principio hasta el final fue una continua devoción por la Ciencia, y debe ser considerado como uno de los intelectuales más importante del siglo XIX”*. Su primer gran tratado (1847) versó sobre la conservación de la energía en el campo de la medicina, descubrió que el principio de conservación de la energía era válido en los músculos. Su contribución a la acústica se publicó en un libro titulado *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music*.

Helmholtz inventó el resonador que lleva su nombre para valorar la importancia de los distintos tonos de un sonido. Básicamente, consistía en una serie de esferas huecas de vidrio con dos cuellos tubulares cortos y abiertos. Cada esfera

tenía dichos cuellos situados en extremos diametralmente opuestos. Uno de los cuellos se aplicaba al oído mientras el otro se acercaba a la fuente de sonido. Si la composición del sonido contenía una frecuencia igual o muy próxima a la frecuencia resonante de la cavidad del resonador, éste la amplificaba permitiendo percibir el tono aisladamente. Utilizando una serie de estos resonadores es posible tener una idea muy aproximada de las distintas frecuencias que componen cada sonido estudiado. De esta manera se puede deducir que los sonidos complejos están compuestos por un conjunto de tonos puros más simples que es posible aislar y escuchar con los resonadores de Helmholtz.

La necesidad de comunicación a nivel mundial durante el siglo XIX, por intereses exclusivamente económicos, fue la causa que motivó a un gran número de inventores para que desarrollaran su trabajo en torno al telégrafo.

David Edward Hughes (1831-1900), figura 2.5, fue un físico estadounidense de origen británico que contribuyó decisivamente en el desarrollo de la acústica. Su formación musical de una parte y sus conocimientos de física por otra, fueron fundamentales en el desarrollo de sus inventos.

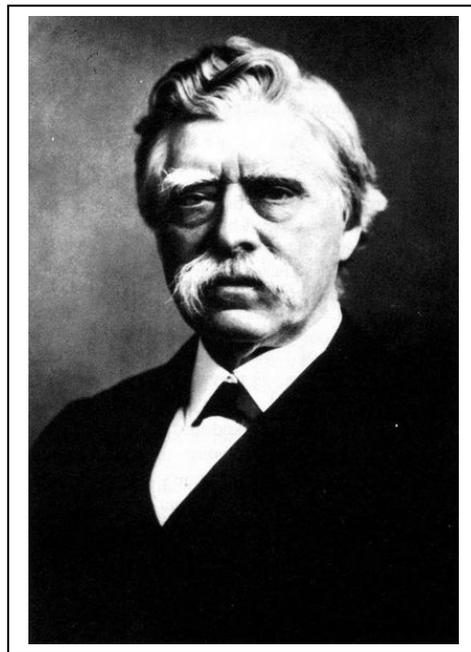


Figura 2.5.- David Edward Hughes inventor del primer micrófono.

Mientras ejercía como profesor de música en St. Joseph's Collage de Bardstown en Kentucky, se centró en sus estudios de física como medio para desarrollar instrumentos eléctricos. Hughes inventó, casi por casualidad, el primer

sistema de impresión para el telégrafo que patentó en 1855. Realmente Hughes pretendía encontrar un mecanismo que transcribiera las notas musicales mientras se ejecutaba una pieza, y así surgió el mencionado sistema de impresión.

El telégrafo de Hughes superaba al telégrafo de Morse, pues permitía transmitir hasta 60 palabras por minuto frente a las 25 palabras del sistema Morse. Su invento fue patentado en Francia después de haberlo intentado en Estados Unidos y en su Inglaterra natal sin éxito. El telégrafo de Hughes fue utilizado en toda Europa hasta los años treinta. Posteriormente fue adoptado e instalado en todo el mundo por la Western Union Telegraph Company.

El invento de Hughes consistía en un telégrafo de impresión con un teclado parecido al de un piano, donde se evidencia claramente su formación musical. Cada tecla pulsada enviaba una señal equivalente a una letra, mediante un código perforado, hasta la impresora situada en el lugar de recepción del mensaje, como puede apreciarse en la figura 2.6. El sistema de registro es parecido al del fonógrafo del inventor francés Edouard-Leon Scott de Martinville en 1857.

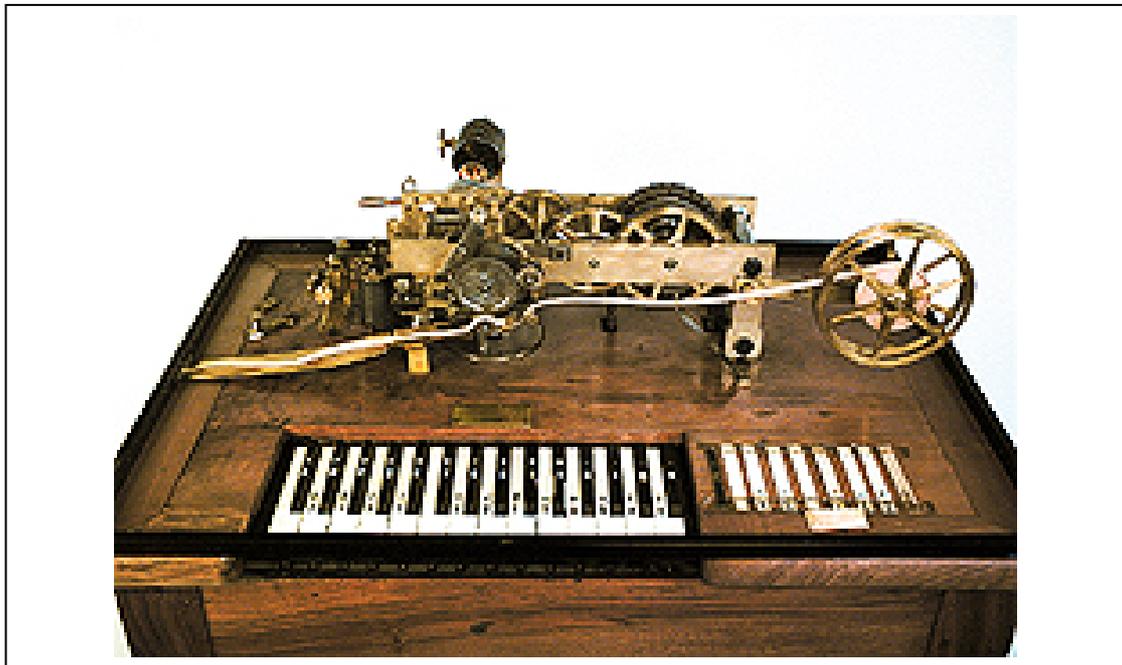


Figura 2.6.- Primer sistema de impresión de telegramas inventado por Hughes.

El invento más relevante de Hughes por su trascendencia para la acústica fue el micrófono. En honor a la verdad habría que decir que Alexander Graham Bell utilizaba un dispositivo igual en su teléfono. Hughes construyó el micrófono para

demostrar empíricamente que era posible transformar el sonido en corriente eléctrica, figura 2.7.



Figura 2.7.- Rudimentario micrófono atribuido a Hughes.

Había descubierto que los contactos eléctricos sueltos eran sensibles a las vibraciones producidas por el sonido, por lo que si había un contacto suelto en un circuito que contenía una batería y un transmisor de voz de teléfono, se podía generar un campo electromagnético. Cuando las vibraciones llegaban al diafragma de la boquilla, este transformaba la onda sonora en electricidad. Hughes no llegó a patentar el micrófono, revelando el secreto de su funcionamiento a la Royal Society de Londres en 1878. Desde un punto de vista estrictamente técnico, de los artilugios desarrollados en el periodo comprendido entre 1870 y 1880, es al micrófono de carbón al que podemos atribuirle el título de primer micrófono de la historia de la humanidad. La invención de este micrófono se la disputaron, además de Hughes, otros inventores como Thomas A. Edison, y quien realmente lo patentó, el estadounidense de origen alemán Emile Berliner en 1876, figura 2.8.

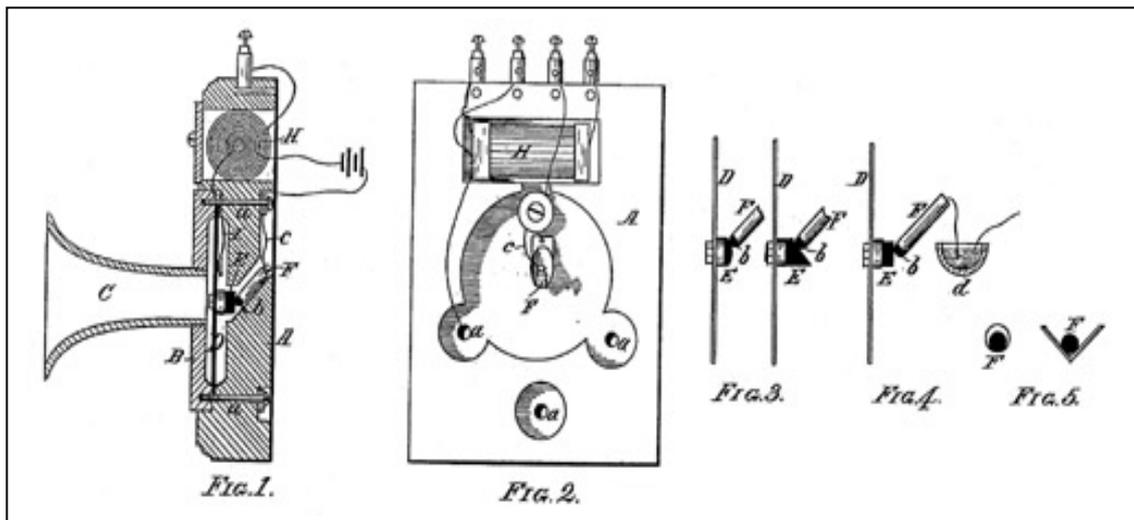


Figura 2.8.- Esquema del micrófono de carbón patentado por Emile Berliner.

El funcionamiento de este micrófono se basa en conectar un trozo de carbón a un circuito eléctrico alimentado por una pila. En contacto con el carbón, dos placas capaces de transmitir en forma de presión la vibración generada por la onda sonora incidente. La resistencia que ofrece el trozo de carbón al paso de la corriente está relacionada con la mayor o menor presión ejercida por la placa, modificando por lo tanto la corriente eléctrica que circula por el circuito. Con posterioridad, Siemens inventó en 1877 un micrófono consistente en un bobinado unido a un diafragma, que recibía la onda sonora y producía pequeños desplazamientos acortando la longitud de la bobina. Este movimiento modificaba sensiblemente el campo magnético estacionario. El micrófono de Siemens es conocido como de bobina móvil y se utilizó mayoritariamente en los teléfonos desarrollados desde 1920 a 1930.

También hay que atribuirle a Emile Berliner (1851-1929) el gramófono en competición con el fonógrafo de T. A. Edison, ambos son registradores reproductores del sonido. Berliner también trabajó en aplicaciones dirigidas a la atenuación de las vibraciones, diseñó unas baldosas pensadas con la finalidad de amortiguar el ruido estructural, probablemente para mejorar el funcionamiento de sus inventos.

Thomas Alva Edison (1847-1931) fue un inventor y hombre de negocios con gran ambición por la obtención de patentes. Su experiencia como telegrafista le llevó a construir el fonógrafo en 1877 como ya se ha comentado. No fue el único aparato patentado por Edison durante este periodo de su vida. Se le atribuye la invención de la lámpara incandescente, la cual patentó, pero hoy día se sabe que el relojero alemán Heinrich Göbel había fabricado lámparas tres décadas antes. No obstante, el invento fue perfeccionado por Edison hasta hacerlo comercial. Su mayor aportación fue conseguir un filamento de carbón capaz de alcanzar la incandescencia sin fundirse. En 1879 logró que su primera bombilla luciera de forma continuada durante cuarenta y ocho horas, consiguiendo la patente cuatro años después.

La aportación más significativa de Edison, desde el punto de vista científico, pasó desapercibida para los científicos de la época, el efecto que lleva su nombre. El efecto Edison consiste en el paso de electricidad desde un filamento a una placa metálica dentro de un globo de lámpara incandescente. Posteriormente, L. de Forest dando uso a este artilugio, crearía la primera lámpara electrónica.

El interés de Edison por obtener un reproductor de imágenes en movimiento le llevó a patentar una película perforada de fotogramas, ya que el efecto del

movimiento a partir de imágenes estáticas, lo había conseguido George Eastman con anterioridad. Un gran número de prototipos y aparatos para proyectar películas de cine ocuparon a Edison en la etapa final de su vida, como el kinetoscopio y el vitascopio que no llegaron a imponerse frente al proyector de los hermanos Lumière.

Alexander Graham Bell (1847-1922) fue un inventor muy controvertido, ya que se le atribuye el invento del teléfono que patentó en 1876 en Estados Unidos. Es cierto que fue el primero en conseguir una patente del teléfono, pero no es menos cierto, que existen argumentos suficientes para atribuirle el invento al italiano Antonio Meucci, que ya poseía una patente temporal en Estados Unidos, y que no pudo encontrar la aportación económica necesaria para patentar definitivamente su invento. En 1873 el italiano buscaba un patrocinador, enviando los bosquejos del aparato a la compañía Western Unión para la cual trabajaba el escocés A. G. Bell.

En un campo distinto, Wallace Clement Sabine (1868-1919) fue pionero en el conocimiento de la acústica aplicada a la arquitectura. Su primer trabajo fue mejorar la acústica de la sala de estudio de la Universidad de Harvard y, de la experiencia obtenida, descubrió la relación entre el volumen de una sala V , su absorción sonora A y el tiempo de reverberación T_r . La fórmula relaciona estas variables junto a la constante de Sabine de la siguiente forma, $T_r = 0.163(V/A)$. Estableció también como unidad de absorción sonora el metro cuadrado, considerando que su valor era la unidad cuando un material tenía la misma absorción que una ventana abierta de un metro cuadrado.

El italiano, Guglielmo Marconi (1874-1937) fue un inventor fascinado por el estudio de la electricidad. Estudió apasionadamente los trabajos del físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), que fue el primero en construir un aparato que producía y detectaba radiaciones electromagnéticas. Estas ondas, inicialmente fueron denominadas Herzianas, hoy son conocidas como ondas de radio. La abundante información que publicó Hertz sobre sus inventos, antes de morir, fue utilizada por Marconi para continuar con su trabajo.

El invento más importante desarrollado por Marconi fue la radio, el primer telégrafo sin hilos con un alcance de unos cientos de metros. Marconi se trasladó a Londres para continuar su investigación, aumentando cada vez más la distancia de transmisión en Morse y, finalmente, patentó su invento en 1897 en la Oficina de Patentes Británica. La gran aplicación de su invento a principios del siglo XX fue la

comunicación con los barcos que navegaban en alta mar, donde al aumentar la distancia se requería de antenas de mayor altura. Recibió el Premio Nóbel en 1909.

El matemático y físico teórico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) no hizo aportaciones directas al campo de la acústica, pero sí influyó decisivamente en dos aspectos. En primer lugar, Maxwell demostró que los campos eléctricos y magnéticos viajan a través del espacio en forma de ondas; y en segundo lugar, influyó decisivamente en la formación de Lord Rayleigh al coincidir con él en la Universidad de Cambridge. Maxwell es considerado por muchos científicos como el físico del siglo XIX que más ha influido en los científicos del siglo XX. Como ejemplo de esta afirmación, Albert Einstein dijo que, “*El trabajo de James Clerk Maxwell es el más profundo y fructífero que la física ha experimentado desde los tiempos de Newton.*”

2.5.- Lord Rayleigh, el nacimiento de la acústica moderna

Durante el siglo XIX la cantidad de artilugios mecánicos relacionados con el telégrafo, el teléfono y los instrumentos capaces de registrar y reproducir sonidos musicales, así como la voz humana, fue enorme. Sin embargo, la aportación al conocimiento científico de la acústica teórica fue realmente escasa. Maxwell aportó el rigor teórico a campos del saber relativamente próximos a la acústica. Su riguroso estudio sobre la propagación de las ondas electromagnéticas, pudo ser la base en la que se apoyó un joven como John William Strutt (1842-1919), para aplicarlo al campo de la acústica, figura 2.9. Sobre lo que no cabe la menor duda, es que J. W. Strutt estableció los fundamentos de la acústica moderna con su publicación de *The Theory of sound*.

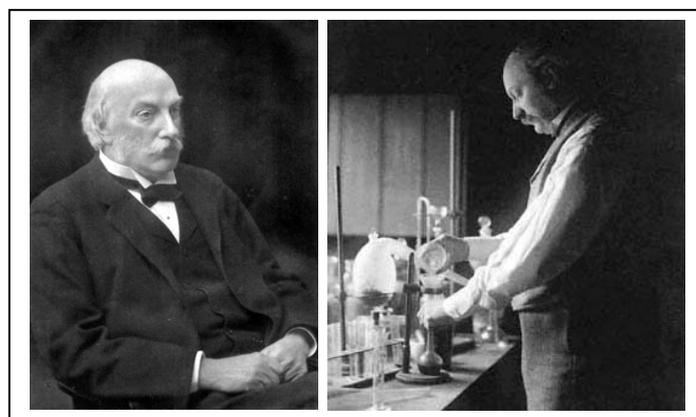


Figura 2.9.- John William Strull, tercer barón Rayleigh.

A la muerte de su padre, John William Strutt, se convierte en el tercer barón Rayleigh (1873), siendo conocido a partir de ese momento por el título honorífico de Lord Rayleigh. A pesar de padecer serios problemas de salud, debido a una infección en las vías respiratorias cuando era un niño, Lord Rayleigh mostró a temprana edad un gran interés por las matemáticas. Como profesor de Física en Cambridge se dedicó a enseñar sobre óptica y vibraciones. Trabajó en temas tan variados como: teoría de ondas, refracción de la luz, electrodinámica, hidrodinámica, viscosidad y fotografía. Se dice que era un gran docente, destacando sobre todo por su mentalidad práctica al diseñar un gran número de experimentos que demostraban los contenidos teóricos sobre el sonido. La acústica no fue la única disciplina científica sobre la que trabajó, pero es cierto que en sus publicaciones dejó claramente definidos los principios teóricos y prácticos que rigen los fenómenos relacionados con el sonido. Lord Rayleigh recibió el Premio Nobel de Física en 1904 por el descubrimiento del gas argón.

La Teoría del Sonido fue publicada en dos volúmenes entre 1877 y 1878. El Volumen I trata sobre: vibraciones armónicas, sistemas con un grado de libertad, sistemas vibratorios en general, vibraciones transversales de cuerdas, vibración longitudinal y torsional de barras, vibración de membranas y platos, vibraciones de placas curvadas y vibraciones eléctricas. El Volumen II trata sobre: vibraciones en el aire, vibraciones en tubos, reflexión y refracción de ondas planas, ecuaciones generales, teoría de los resonadores, funciones de Laplace y acústica, vibración de cuerpos sólidos y teoría de la audición. En la figura 2.10 se muestra la portada original de la conocida como “la Biblia del sonido” y la firma original de Lord Rayleigh.

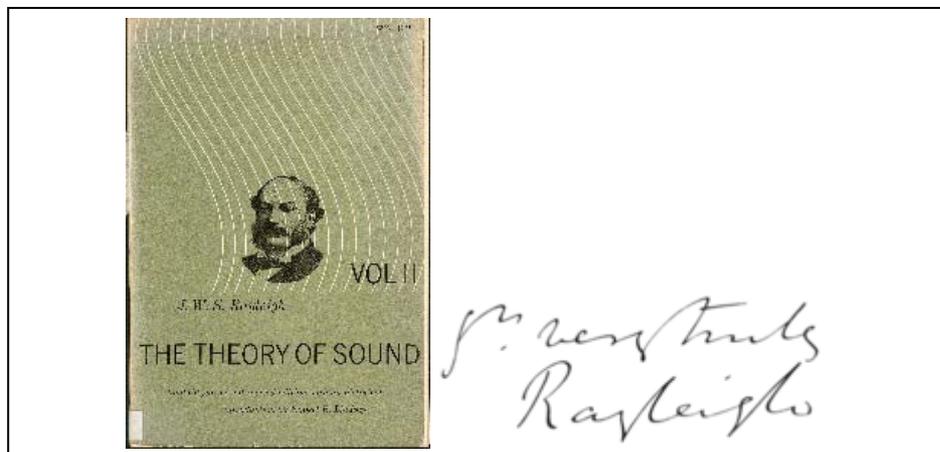


Figura 2.10.- Portada de la obra *La Teoría del Sonido* y firma de John William Strull.

La intensidad sonora es la base de *La Teoría del Sonido* publicada por Lord Rayleigh. Sin embargo, este científico no consiguió medirla. Fueron necesarios más de cincuenta años hasta que se consiguió un método práctico para su determinación como parámetro acústico.

2.6.- El siglo XX, la era de la electrónica

A principios del siglo XX, el rápido desarrollo de la electrónica permitió avances muy importantes en el diseño de los instrumentos de medida. Entre ellos, se encuentra el amplificador de triodo inventado por L. de Forest en 1906 y el primer micrófono de condensador diseñado por E.C. Wenthe en 1915.

Hace cien años, el estadounidense Lee de Forest (1873-1961), optimizó el tubo de vacío dando lugar a un cambio técnico de vital importancia. Se puede afirmar que nace la electrónica tal y como la conocemos hoy día. Su invento va a generar un desarrollo en cascada de equipos e instrumentos electrónicos capaces de revolucionar el mundo científico. Lee de Forest es el inventor más importante de tecnología electrónica en la primera mitad del siglo XX. Creó una escuela importante de discípulos que continuarían generando avances a lo largo de varias décadas. La radio que hoy conocemos, ha cambiado en esencia muy poco con respecto a la diseñada en su día por este científico. Seguidor de los estudios de Marconi y de Hertz hizo la tesis doctoral (1899) en la reflexión de las ondas Herzianas. Lee de Forest registró 180 patentes, siendo la más importante de todas el Audión (1907), véase figura 2.11. Este primer tubo de vacío permitió el desarrollo de la radio y la televisión.

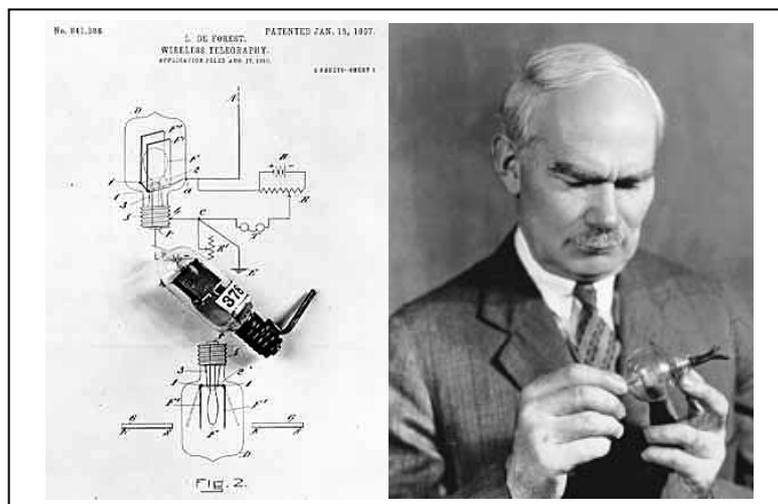


Figura 2.11. - Lee de Forest con su Audión patentado el 15 de enero de 1907.

Como aplicación de su invento, L. de Forest construyó el primer instrumento musical electrónico, el piano Audiófono en 1915. El teclado usaba circuitos con este peculiar tipo de lámparas, denominados osciladores por su inventor, siendo capaces de generar ondas electromagnéticas a frecuencias predefinidas. El piano electrónico poseía un circuito para cada nota musical y no permitía la superposición de notas.

En los primeros años del siglo XX todavía existía un gran interés por la comunicación a través de la radio. Pero un invento espectacular como fue el proyector cinematográfico por parte de los hermanos Lumière, sería el origen de una industria floreciente. El cinematógrafo fue patentado en 1894 por Louis Jean Lumière (1864-1948) y Auguste Marie Louis Nicholas Lumière (1862-1954).

La industria cinematográfica se había revelado como una fuente económica de gran importancia. En los años 20 se encontraba en pleno desarrollo, pero aún no había sido posible incluir el sonido en las proyecciones que tenían lugar en todas las ciudades del mundo. Las grandes compañías del momento, Radio Corporation of America (RCA) y American Telephone and Telegraph Company (AT&T), competían por obtener un sistema que incorporara el sonido a las películas de cine, figura 2.12.

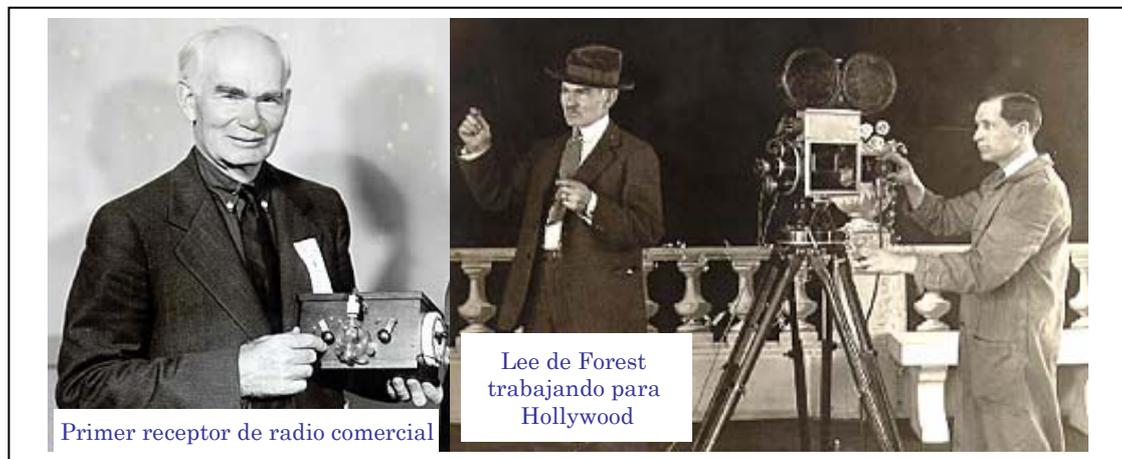


Figura 2.12. - Lee de Forest con su primer receptor de radio comercial a la izquierda. En la derecha trabajando en la incorporación del sonido a una película de cine.

Ya era posible hacer registros de sonido sobre discos utilizando micrófonos de carbón o de bobina móvil. Dichos registros podían reproducirse posteriormente con amplificadores electrónicos que utilizaban el triodo de L. de Forest y que se conectaban a altavoces. El problema radicaba en que la imagen y sonido se reproducían por instrumentos distintos que requerían sincronismo. Existe constancia de que los ingenieros que trabajaban para la industria cinematográfica,

ganaban más dinero que las grandes estrellas de cine del momento. Lee de Forest, que ya había desarrollado y comercializado distintos tipos de receptores de radio, comienza a trabajar en un nuevo reto técnico, consistente en diseñar un sistema capaz de incluir el sonido en la película que portaba los fotogramas.

El resultado fue un sistema novedoso de registro de sonido, constituido por un dispositivo óptico que permitía incorporar la señal de audio a la película de fotogramas en el lado derecho. Un detector sensible a los pulsos de luz, convertía la imagen en una señal eléctrica que podía ser amplificada por un altavoz.

Paralelamente, los micrófonos de carbón se utilizaban en aplicaciones de telefonía por su aceptable respuesta a frecuencias comprendidas entre los 200 Hz y los 3000 Hz, siendo los únicos que se comercializaban hasta el momento. Dicha respuesta era ideal para captar la voz humana, tenían gran sensibilidad y baja impedancia, figura 2.13. Sin embargo, no se podían utilizar como micrófonos de audio ya que generaban bastante ruido y la respuesta en frecuencia era irregular. El estadounidense Edward Christopher Wenthe (1889-1957), empleado de la Western Electric, fue el encargado de diseñar y desarrollar en 1915 un micrófono con calidad suficiente para utilizarse en estudios de sonido, figura 2.13.

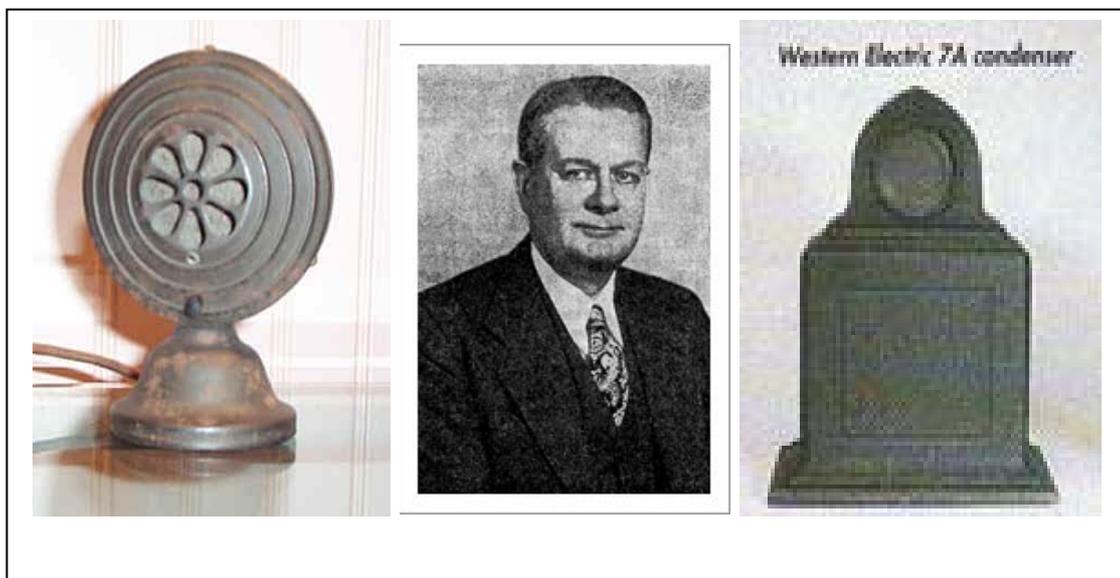


Figura 2.13. - A la izquierda un micrófono de carbón de principios del siglo XX. En el centro Edward C. Wenthe y a la derecha el primer micrófono de condensador comercializado por Western Electric.

Utilizó una nueva tecnología consistente en una lámina fina que actuaba como una placa de un condensador. La onda sonora se transmitía a la placa en forma de vibración, modificándose la distancia entre placas. Al ser alimentadas con la

misma carga y cambiar la capacidad del condensador por el movimiento, variaba la tensión. La respuesta resultante era prácticamente plana frente a la frecuencia, pero la señal que se generaba era muy débil. Para solucionar este problema, Wente utilizó un amplificador diseñado por H. D. Arnold. Este transductor tuvo gran aceptación hasta el punto de que en 1922, existía un micrófono con sensibilidad suficiente para utilizarse en aplicaciones de estudio, aunque seguía requiriendo de un preamplificador debido a su elevada impedancia.

El doctor Wente participó en otros campos de la acústica distintos del desarrollo electrónico imperante, tales como: el diseño de auditorios y cámaras anecóicas, tratamientos acústicos de paredes, registradores magnéticos de alta calidad, medidores de tiempo de reverberación, altavoces electrodinámicos, sintetizadores de hasta cien tonos y aplicaciones acústicas de uso militar.

Las aportaciones de E. C. Wente fueron decisivas para el desarrollo de la acústica en la segunda mitad del siglo XX. Con el desarrollo del micrófono de condensador, sobre todo desde el punto de vista de la calidad de la medida del sonido, se abre el camino para el desarrollo de una tecnología propia de este tipo de transductores para uso científico. En 1922 publicó, para la American Physical Society, un artículo donde se definían las características técnicas de sensibilidad y precisión de los micrófonos de condensador [86]. Indicándose que la sensibilidad y precisión de las medidas se había ensayado durante un tiempo suficiente, permaneciendo constante ante las variaciones de presión, temperatura y humedad atmosférica en un ancho de banda comprendido entre 10 y 12000 Hz. Los micrófonos de condensador producidos en serie por AT&T utilizaban un diafragma de acero de 51 micra de espesor, la frecuencia de resonancia estaba en 7000 Hz y la sensibilidad era de 0,35 mV/dina. En esta publicación, E. C. Wente plantea un procedimiento técnico utilizando un micrófono de condensador y un galvanómetro de vibración, que conectado a un amplificador permitiría medir la intensidad sonora. Es la primera referencia verosímil sobre la posibilidad de medir este parámetro acústico.

Otro ingeniero pionero en el campo de la acústica del siglo XX fue el estadounidense Harry F. Olson (1901-1982). Doctor a la temprana edad de veintiocho años, realizó su tesis en el diseño mecánico de filtros de ondas sonoras. Su tesis fue dirigida por el profesor Stewart que fue el inventor de los filtros de ondas acústicas en la Universidad de Iowa. Harry F. Olson trabajó durante cuarenta años

en la Radio Corporation of America (RCA) en proyectos importantes para la compañía. El principal campo de trabajo de Olson fue el diseño de micrófonos de altas prestaciones para la industria cinematográfica.

La primera gran dificultad con la que se encontró, fue obtener un micrófono muy direccional que permitiera la grabación a distancia del audio de las películas de cine, evitando así, los problemas de ruido de fondo originados normalmente por la reverberación en los estudios cinematográficos. En la década comprendida entre 1920 y 1930 el doctor Olson desarrolló el micrófono de cinta, que junto con el de bobina móvil, se catalogan dentro de los transductores de sonido electrodinámicos. Ambos se basan en un principio similar, donde un diafragma provoca el movimiento de una bobina móvil o una cinta corrugada dentro de un imán permanente, las fluctuaciones del campo magnético son transformadas en tensión eléctrica.

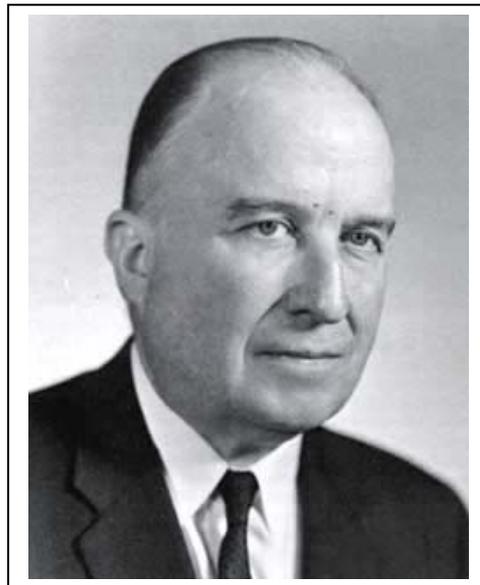


Figura 2.14. - *Harry F. Olson ingeniero durante cuarenta años de la RCA.*

El micrófono de cinta inventado por H. F. Olson, figura 2.14, se comercializó a partir de 1930, aventajando al de bobina móvil en que tenía una sensibilidad aceptable en un ancho de banda mayor, siendo además bidireccional. En la figura 2.15 se puede apreciar el primer micrófono de cinta comercializado por la RCA. Este tipo de micrófono realmente detecta el gradiente de presiones que existe a ambos lados del diafragma o membrana, moviéndose libremente hacia detrás y hacia delante en función de la presión sonora incidente. También son conocidos con la denominación de micrófonos de velocidad. Olson utilizó uno de estos micrófonos para medir la velocidad de las partículas del aire y un micrófono de condensador para

determinar la presión sonora simultáneamente. Una aplicación, derivada del desarrollo de un micrófono de cinta unidireccional, fue el primer transductor para la medida de la intensidad sonora.



Figura 2.15.- Micrófono de cinta bidireccional a la izquierda y unidireccional a la derecha patentados por Harry F. Olson para la RCA.

Cuando se consiguió que los micrófonos comercializados poseyeran una buena fiabilidad de funcionamiento y sensibilidad de medida aceptable, el desarrollo de inventos más o menos ingeniosos para aplicarlos a medidas acústicas inicia su andadura. En el año 1931, Clarence A. Andree patenta un aparato denominado acustómetro que servía para determinar la reverberación de salas [2]. Comienza pues, la proliferación de equipos de medida del sonido durante esta década, el interés empieza a ser de aplicación científica además del cinematográfico. El principal problema de los equipos de medida era su baja portabilidad, lo que impedía su utilización fuera de laboratorios especializados.

La primera medida de flujo neto de energía sonora se hizo en 1932, cuando Harry F. Olson para la Radio Corporation of América (RCA), patentó su *System Responsive to the Energy Flow of Sound Waves*. El sistema estaba formado por un micrófono para medir presión sonora, un micrófono de velocidad o de cinta para medir la velocidad de las partículas del aire, un sistema de filtrado de la señal y amplificación de ésta, y finalmente, un vatímetro para cuantificar la potencia acústica [64]. Sin embargo, el invento tenía limitaciones técnicas considerables que no permitían su uso fuera del laboratorio, entre ellas la baja portabilidad como ya se

ha mencionado. El sistema patentado por Harry F. Olson utilizaba un sistema de medida de la intensidad sonora, figura 2.16, que fue patentado simultáneamente por su compañero de trabajo en la RCA, Irving Wolff [91].

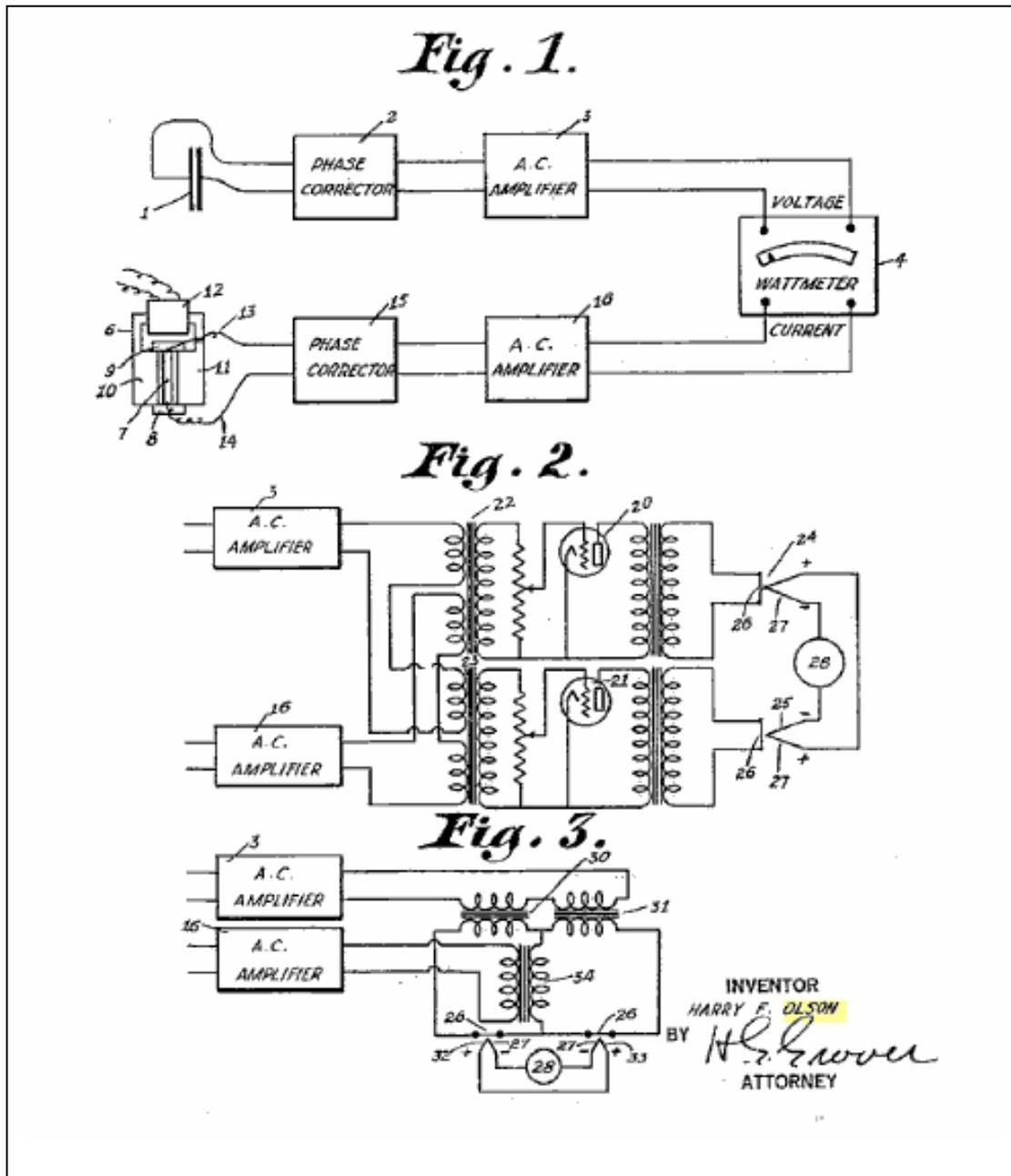


Figura 2.16.- En la figura se muestra el plano original que utilizó Olson para patentar el primer sistema capaz de medir la intensidad sonora.

Como muchos ingenieros Olson trabajó durante la 2ª Guerra Mundial para la industria militar, particularmente en el campo de la acústica submarina. Con más de sesenta patentes relacionadas con la acústica, también contribuyó junto a Herbert Belar en el diseño del primer sintetizador electrónico moderno en 1955 al que

llamaron Mark I. Durante las décadas siguientes se perfeccionaron y desarrollaron nuevas tecnologías para obtener micrófonos mejores y más pequeños. El tipo de micrófono que se impuso, para ser utilizado por el mundo científico a partir de 1950 hasta nuestros días, fue el micrófono de condensador.



Figura 2.17.- Primer equipo portátil para medida de sonido capaz de hacer espectros en frecuencia.

A principio de los años cuarenta, dos ingenieros daneses, Per V. Brüel y Viggo Kjaer aportaron la solución comercial al problema de la portabilidad de los equipos para medidas acústicas y de vibración. Desarrollaron un analizador de frecuencias sonoras con baterías, véase la figura 2.17, que patentaron en 1942.

2.7.- La medida de la intensidad sonora en los últimos cincuenta años

Por primera vez en 1943, Bolt y Petrauskas utilizan dos micrófonos para calcular la impedancia acústica de grandes paneles y de distintos materiales comerciales. Se aplica de forma práctica un método de medida relativamente rápido para determinar la impedancia acústica, tal y como se recoge en la publicación de los autores en *The Journal of the Acoustical Society of America* [6]. Este método supuso una forma de investigar los efectos de paneles vibrando en su posición de montaje. La presión sonora y el gradiente de presión se obtenían con dos micrófonos cerca de la superficie y en dirección normal a ésta. Los autores aportaron una expresión

matemática (2.1), que permitía calcular la impedancia acústica compleja de forma aproximada y en condiciones muy limitadas.

$$\frac{Z}{\rho c} \cong \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \left| \frac{p_1 + p_2}{p_1 - p_2} \right| e^{i\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)} \quad (2.1)$$

Donde, p_1 y p_2 son las presiones medidas por los dos micrófonos, d es la distancia que separa los micrófonos, λ es la longitud de onda y θ el ángulo de fase de la impedancia. Esta aproximación es razonablemente buena para relaciones grandes de λ/d , mayores a 10. Las señales de los micrófonos eran tratadas por un circuito electrónico que daba valores lineales de la adición y la sustracción de las tensiones de salida de los transductores. Por medio de un dial se ajustaba la fase y la magnitud hasta que resultara nula, obteniéndose los valores de impedancia. Este equipo de medida funcionaba con cierta precisión en el rango de frecuencia de 50 a 500 Hz. Durante los años cincuenta, la firma comercial Brüel & Kjaer, desarrolla y fabrica en 1959 el primer calibrador de micrófonos por reciprocidad. Esta aportación permitiría el desarrollo de los micrófonos para aplicaciones científicas, que tendría un gran auge en años venideros. El desarrollo y comercialización de los equipos medidores de nivel sonoro, conocidos como sonómetros, es una realidad a partir del año 1960. En la figura 2.18 se muestra el sonómetro patentado por Paul Lee Michael en 1963 para aplicaciones industriales que denominó como Industrial Noise Hazard Meter [58].

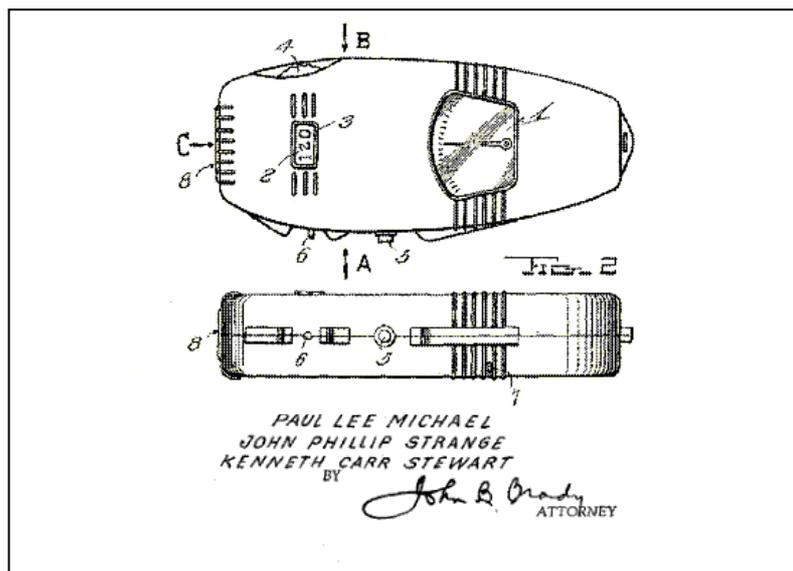


Figura 2.18. Sonómetro patentado por Paul L. Michael en 1963, representativo de los equipos existentes a principio de los años sesenta.

El avance cualitativo en el desarrollo de los micrófonos de condensador junto a la aportación de Bolt y Petrauskas, permitió que Theodore J. Schultz en 1958 determinara la intensidad sonora a partir de la medida de la velocidad de las partículas del aire, utilizando dos micrófonos de condensador separados una distancia definida, figura 2.19.

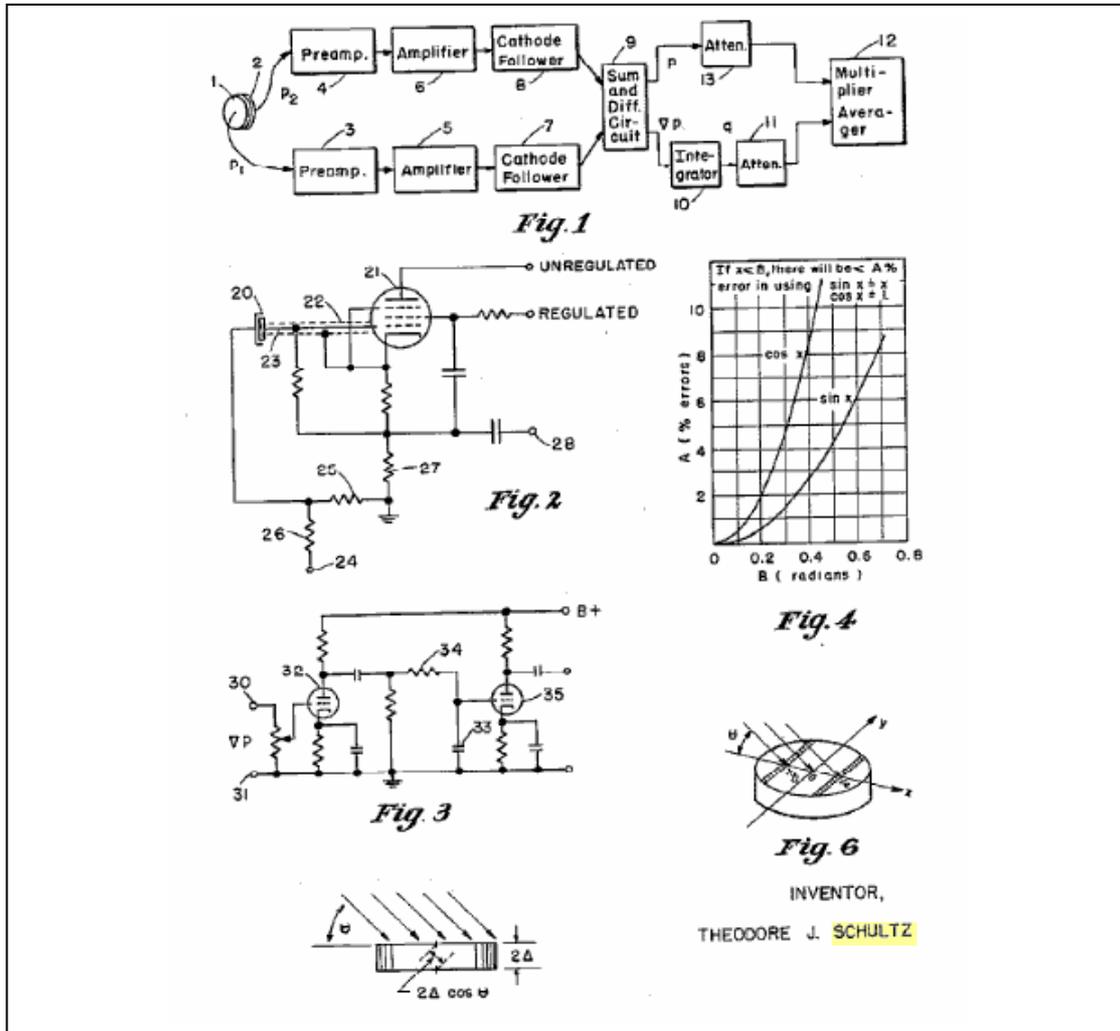


Figura 2.19.- En la figura se muestra el circuito original del vatímetro acústico que patentó Theodore J. Schultz.

En general las medidas no fueron excesivamente satisfactorias, debido a que el espaciado empleado entre micros era demasiado pequeño; y por otra parte, las señales eléctricas con las que trabajaba el equipo de medida resultaban un tanto débiles. No obstante, supuso un avance considerable ya que se definió parte de la formulación teórica de las sondas actuales, así como, la utilización de dos micrófonos de condensador iguales para medir la diferencia de fase de la presión sonora en dos puntos próximos del campo sonoro. Schultz denominó a su equipo de medida como

vatímetro acústico [76], ya que como él mismo expresó, “*A este respecto, el aparato patentado, es análogo al vatímetro de un circuito eléctrico que da un valor del producto instantáneo promediado de la tensión y la corriente, y por esta razón el aparato es denominado vatímetro acústico*”.

Realmente este invento realizaba el producto de la señal de la presión sonora y la señal de la velocidad de las partículas del aire. El propio Theodore J. Schultz, ya mencionaba que existían dos flujos de energía distintos, uno denominado flujo neto y otro que se corresponde con la componente reactiva. El vatímetro solo respondía al flujo neto de energía, además, el “*vatímetro acústico*”, podía ser modificado para medir la impedancia acústica. Entre las aplicaciones que le atribuye su inventor, que constan en la documentación existente en la Oficina de Patentes de los Estados Unidos, destacan las siguientes: determinación de coeficientes de absorción de materiales in situ, localización de la mayor emisión de ruido en estudio de superficies sometidas a vibración y determinación del grado de dispersión de una campo sonoro en una habitación.

Desde 1958 hasta 1974 apenas hubo desarrollos en el campo de la medida de la intensidad acústica. Quizás el más reseñable sea la aportación de James F. Kaiser en 1962, que patentó un sistema de control normalizado de sonido. Basándose en el vatímetro acústico de T. J. Schultz, diseñó un sistema que permitía aumentar la inteligibilidad de la voz de una persona en un entorno ruidoso [55].

Harry F. Olson, en 1974, recuperó la idea de su patente de 1932 y publicó un artículo titulado *Field-type acoustic wattmeter* en *The Journal of the Acoustical Society of America* [65], donde se detalla las aplicaciones de la técnica de medida de la intensidad sonora, tales como: medida de potencia sonora a la salida de altavoces, medida de potencia sonora de máquinas en distintas condiciones de operación, la absorción sonora de muros, techos y suelos, rendimiento de sistemas de reproducción de sonido en salas y distribución de campos sonoros. En este mismo año, van Zyl desarrolló como resultado de su tesis doctoral, un medidor de intensidad sonora analógico con ancho de banda y rangos de medida dinámicos [94].

En 1977 aparece en el mercado el primer analizador digital capaz de realizar espectros sonoros en 1/3 de octava en tiempo real, lo que supuso una importante revolución en el concepto de las medidas acústicas. Al producirse el salto técnico de la tecnología analógica a la tecnología digital, dos compañías comerciales comienzan

el desarrollo de sus sondas para medir la intensidad sonora, Metravib y Brüel & Kjaer. Las señales analógicas de los micrófonos son transformadas en digitales y, gracias a la rapidez de tratamiento de los microprocesadores, es posible obtener el gradiente de presiones de forma rápida y precisa. Ambas marcas comerciales se basaron en las publicaciones de los investigadores Frank J. Fahy en Reino Unido y Jing-Yau Chung en Estados Unidos. Fahy presentó en 1977 el procedimiento para determinar el vector de la intensidad sonora utilizando técnicas multicanal de procesamiento de señal en tiempo real. El cálculo esta basado en el uso de un analizador multicanal, obteniéndose la intensidad sonora a partir de la componente imaginaria del espectro cruzado de las señales de los dos micrófonos [20].

Por su parte, Chung en 1978, aportó una modificación en el tratamiento de la señal que minimizaba el error de medida de fase atribuible a la cadena de medida, véase figura 2.20. Estableciendo unos límites, relacionados con el ratio que definieron en su día Bolt y Petrauskas, entre la longitud de onda y la distancia entre micrófonos [7]. Desde 1978 hasta nuestros días, han sido incesantes las mejoras de los distintos elementos que forman parte de la cadena de medida: micrófonos, acondicionadores de señal y analizadores.

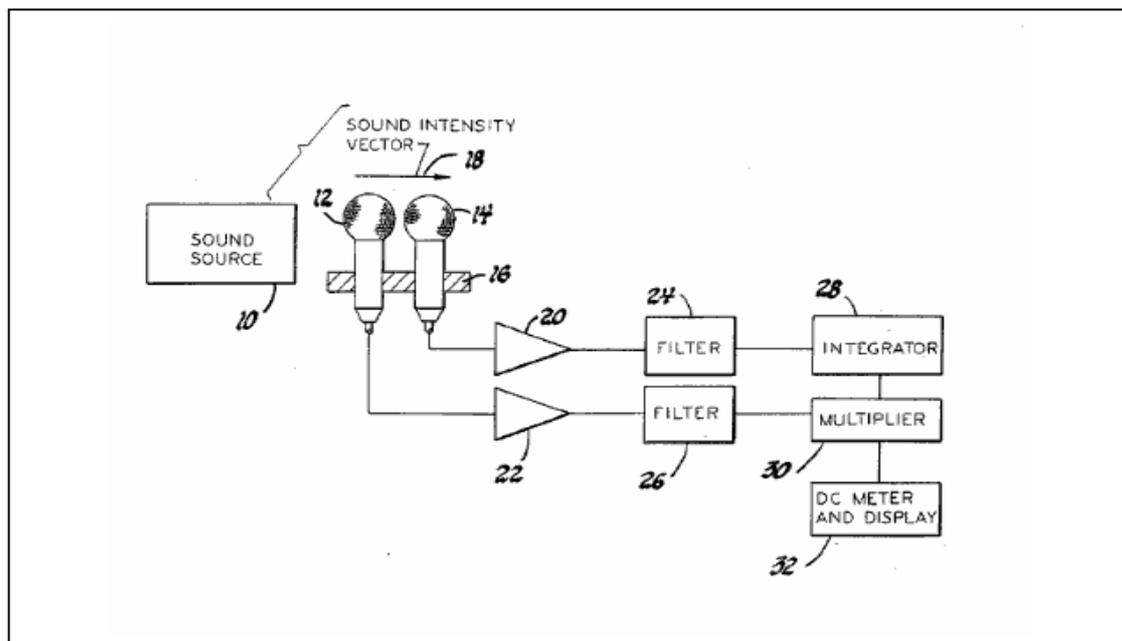


Figura 2.20.- Esquema del sistema de medida patentado por J.Y. Chung en 1978.

Este método de medida utiliza las dos señales de presión sonora de los micrófonos para determinar la velocidad de las partículas del aire. El conjunto es

denominado como sonda de intensidad p-p, figura 2.21. En la actualidad, esta técnica es utilizada en el cálculo de la potencia acústica de máquinas y localización de fuentes de ruido de forma generalizada. También es una alternativa para la medida del aislamiento acústico de elementos divisorios en la edificación, así como, para encapsular máquinas.



Figura 2.21.- Detalle de los micrófonos y del separador de una sonda p-p.

El desarrollo de esta tecnología a nivel científico se realizó de forma rápida, aunque su utilización práctica en las distintas disciplinas relacionadas con la acústica no lo ha sido tanto, debido fundamentalmente a su elevado coste y a su manejo complejo. Durante la década de los años noventa se ha investigado en definir y acotar las diversas causas de error de medida, existiendo un gran número de publicaciones científicas orientadas en esta dirección como las publicadas por Finn Jacobsen [40], [41], [42]. También se han patentado diversos calibradores de sondas de intensidad sonora, como el desarrollado por Koshirai Toshiaki y Shibata Kazuo para la firma comercial Rion en 1989. Se han diseñado y patentado diversos soportes para la sujeción de los micrófonos, incluyendo el desarrollo de sondas de medida espacial para campos sonoros. Se puede concluir que la medida de la intensidad sonora comienza a ser fiable a finales de los años noventa utilizando sondas del tipo p-p.

Con el fin de abaratar la tecnología orientada a la medida de la intensidad sonora, se plantean algunos métodos de medida alternativos al utilizado con la sonda de intensidad del tipo p-p. En 1994, se desarrolla por parte de Hans-Elias de Bree en la Universidad de Twente [12], un transductor conocido como Microflown, cuyo

principio de funcionamiento difiere totalmente con el método clásico de medida con dos micrófonos. Esta sonda de intensidad mide directamente la velocidad de las partículas del aire utilizando una tecnología similar a la empleada por los anemómetros de hilo caliente. La sonda del tipo p-u se comercializa desde el año 2003 en competencia con la sonda del tipo p-p, figura 2.22.

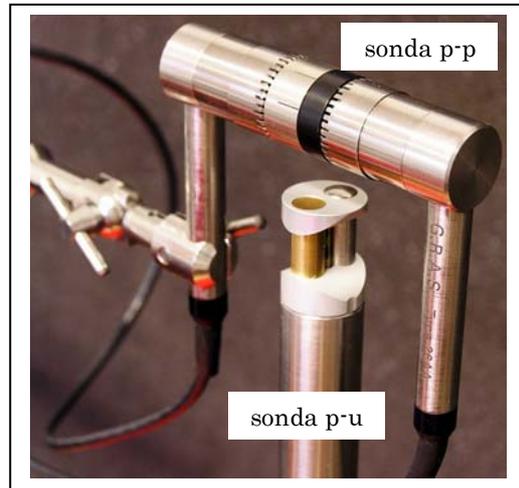


Figura 2.22.- Imagen de la sonda del tipo p-p frente a la sonda microflown del tipo p-u.

Otra tecnología desarrollada, es la propuesta en 1995 por Paul C. Janzen [53], donde el transductor de medida está compuesto por un acelerómetro y un micrófono tipo electret, inventado por el profesor Sessler, montados ambos de forma compacta como se muestra en la figura 2.23.



Figura 2.23.- Sonda del tipo p-u diseñada por Paul C. Janzen, combina un acelerómetro y un micrófono de forma compacta.

Esta sonda de intensidad se basa en la medida por parte del micrófono de la presión sonora y la determinación de la velocidad de las partículas mediante la

integración de la señal del acelerómetro. La sonda requiere del contacto directo con el objeto que emite la energía sonora. Estrictamente hablando no es una sonda de intensidad sonora, sino un artificio que puede permitir la medida de la intensidad en unas condiciones muy concretas, ya que requiere del contacto directo con la fuente, circunstancia que muy probablemente ha impedido su desarrollo. Sobre todo si tenemos en cuenta que es más eficaz la medida de la velocidad de la vibración de un objeto utilizando un interferómetro láser que no requiere contacto directo con la superficie. Además, debe suponerse que la velocidad de vibración de la superficie del sólido medida por el acelerómetro es igual a la velocidad de las partículas del aire. Otra aplicación, muy fructífera en patentes de equipos para medir intensidad sonora, es la relacionada con la acústica submarina que no es objeto de esta tesis.

Con el cambio de milenio, el estudio de los campos acústicos estacionarios y no estacionarios, puede llevarse a cabo por medio de una técnica cuyos fundamentos están relacionados con el desarrollo de la medida de la intensidad sonora. Esta técnica es conocida como Holografía y permite cartografiar el ruido radiado por un objeto de grandes dimensiones en el campo cercano. Para ello, se utiliza un array de micrófonos cuyas señales son combinadas en el procesado, figura 2.24.

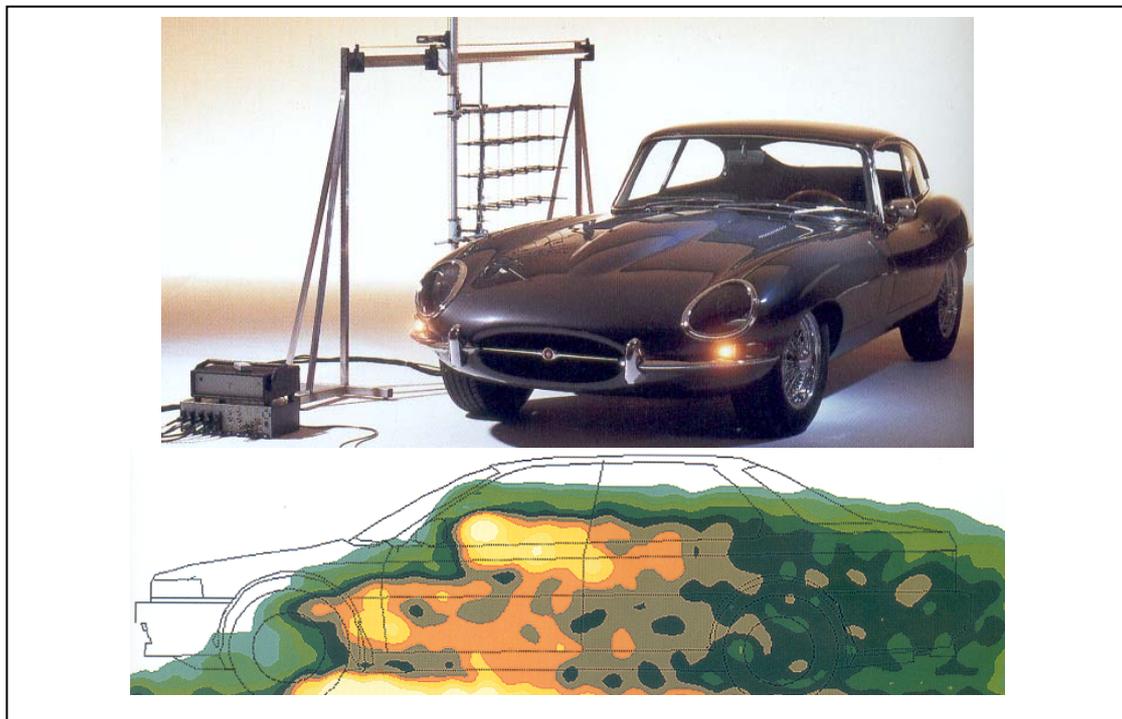


Figura 2.24.- En la parte superior de la figura se muestra el array de micrófonos necesario para aplicar la Holografía a campos sonoros estacionarios y no estacionarios. En la parte inferior, se puede apreciar en la imagen cartografiada, la evolución del campo sonoro y la contribución de las distintas fuentes sonoras.

En la actualidad se trabaja intensamente en la aplicación del principio de reciprocidad para la detección de fuentes de ruido en máquinas y medidas de aislamiento acústico. El principio de reciprocidad en acústica está relacionado con la medida de la intensidad sonora a través de la medida de la velocidad de las partículas del aire, que puede llevarse a cabo: con una sonda del tipo p-p, con una sonda del tipo p-u, con la integración de la señal de un acelerómetro y con un interferómetro laser. Este parámetro que es necesario para determinar la intensidad sonora, es también fundamental en la aplicación del principio de reciprocidad. El profesor emérito de la Universidad de Southampton Frank J. Fahy publicó en octubre de 2002 un interesante artículo, dedicado al científico ruso Leonid M. Lyamshev [28], que lleva por título, *Some Applications of the Reciprocity Principle in Experimental Vibroacoustics*. En dicho artículo se enumeran las posibilidades que tiene la aplicación de este principio en el campo de la vibroacústica. Realmente el principio fue formulado perfectamente por Lord Rayleigh en 1873 ante la Mathematical Society de Londres, aunque habría que decir que el primer científico que afirmó que los campos acústicos cumplían el principio de reciprocidad, fue Hermann von Helmholtz en 1860. En el caso más general, el principio de reciprocidad vibracional afirma que, “*la respuesta o salida de un sistema lineal en un punto a una perturbación periódica o entrada aplicada en otro punto por un agente externo, permanece invariante si se permutan los puntos de entrada y de respuesta*”.

La predicción de la radiación del campo sonoro por cuerpos vibrando resulta compleja, incluso utilizando cualquiera de las tres tecnologías computacionales existentes en el mercado: elementos finitos (FEM), elementos de contorno (BEM) o análisis estadístico de energía (SEA) Las estimaciones analíticas son fiables solo para cuerpos de geometría regular. Cuando la geometría de los objetos es irregular, el recurso práctico es determinar la función de Green que relaciona la vibración normal a la superficie con la presión sonora radiada en el campo acústico, según el principio de reciprocidad.

Tomando un área diferencial dS de una superficie sometida a una vibración, ésta puede ser representada por una fuente monopolar Q_1 actuando en dicha superficie. La función de transferencia entre la fuente y el punto receptor, donde se mide la presión sonora P_1 generada por la mencionada fuente, es idéntica a la función de transferencia de la presión sonora P_2 sobre el cuerpo rígido y una fuente

sonora monopolar Q_2 aplicada en el punto receptor original. En la figura 2.25 se muestra gráficamente los factores que intervienen en el principio de reciprocidad.

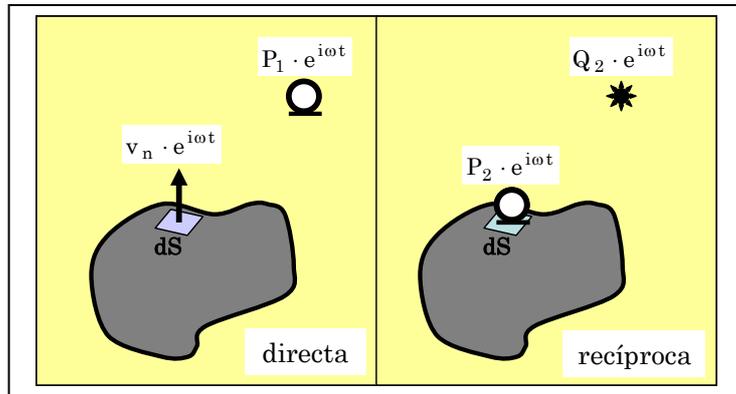


Figura 2.25. - Representación gráfica del principio de reciprocidad en vibroacústica.

La ecuación (2.2) expresa la igualdad entre las funciones de transferencia de la medida directa y de la medida recíproca, donde v_n representa la velocidad de vibración normal de la superficie del cuerpo.

$$\frac{P_1}{v_n dS} = \frac{P_2}{Q_2} \quad (2.2)$$

El campo sonoro total generado por un conjunto de velocidades normales definidas sobre un objeto, se puede obtener midiendo dichas velocidades con una sonda de intensidad del tipo p-p o con una sonda de intensidad del tipo p-u. O bien, midiendo directamente la velocidad de vibración de cada una de las porciones de superficie definidas. La figura 2.26 muestra dos ejemplos de aplicación práctica del principio de reciprocidad en el sector automovilístico.



Figura 2.26. - A la izquierda varias sondas del tipo p-u miden la velocidad normal a una superficie de un automóvil. A la derecha el método de la ventana utilizado para medir la misma superficie con una sonda del tipo p-p.

2.8.- El nuevo milenio, la técnica de medida alcanza su madurez. Comentarios a las últimas aportaciones.

Se puede afirmar que la medida de la intensidad acústica ha alcanzado en los últimos diez años su madurez con respecto a la fiabilidad y precisión en el método de medida. La obtención de la presión sonora no supone ningún problema, lo mismo sucede con la medida de la velocidad de las partículas del aire en el proceso de propagación del sonido. Existen varias tecnologías que permiten medir la velocidad con precisión suficiente, como son: a partir del gradiente espacial de la presión sonora, determinada por la acción espacial de un campo sonoro sobre dos hilos alimentados por una microcorriente eléctrica, por medio de un interferómetro laser y con la integración de la señal de un acelerómetro. De todas las técnicas posibles, tan solo dos resultan eficaces para integrarse en una sola sonda que no requiera contacto: la sonda de intensidad del tipo p-p y la sonda del tipo p-u denominada microflown. La sonda del tipo p-p es la única que tiene normativa internacional de referencia, en concreto, la serie de normas ISO 9614. Los procedimientos de medida están claramente definidos, lo que permite su uso en cualquier parte del mundo. Por el contrario, la tecnología que utiliza la sonda del tipo p-u no está estandarizada. Esta circunstancia limita considerablemente su comercialización, aunque resulta evidente que es una tecnología fiable y que acabará teniéndose en cuenta en la normativa internacional.

En los últimos años se han revisado los fundamentos de la tecnología de medida, aportándose nuevas líneas de trabajo como son: la aplicación del principio de reciprocidad o la visualización de los campos acústicos mediante diversas técnicas que determinan la intensidad acústica en el espacio. En adelante se aportará una breve revisión de las últimas publicaciones relacionadas con la medida y aplicaciones de la intensidad sonora independientemente de la tecnología utilizada.

Finn Jacobsen en el año 2002, publicó un interesante artículo donde se revisaban las causas de los diversos errores de medida [44] que se pueden cometer utilizando una sonda del tipo p-p. La imprecisión puede ser debida a: los desajustes de fase de la cadena de medida, a la aproximación por diferencias finitas, al desajuste en amplitud (sensibilidad), ruido eléctrico, influencia de los micrófonos en el campo sonoro y otros. La publicación se centra fundamentalmente en los errores

por desajuste de fase y amplitud, estableciéndose la importancia de ambos desajuste de medida. Por otra parte, se demuestra que el índice de intensidad residual se obtiene con mayor precisión en un tubo de impedancia.

La implementación de técnicas computacionales, que requieren como datos de entrada la medida de la presión sonora o de la velocidad de las partículas del aire en el campo cercano a la fuente objeto de estudio, aporta información respecto de las características de las fuentes de ruido. René Visser publicó en los años 2002 y 2003, los resultados de aplicar la técnica de Función de Respuesta en Frecuencia Inversa (IFRF) utilizando el Método de los Elementos de Contorno (BEM), a partir de las medidas de los parámetros acústicos. Obteniéndose mayor precisión en la determinación de los modos de vibración de una placa al procesar los valores de la velocidad de las partículas frente a los valores de la presión sonora [83], [84].

Una serie de publicaciones durante el año 2004, aportan la comparación de la precisión de las medidas realizadas con los dos tipos de sondas p-p y p-u. En esencia se compara la sonda del tipo p-u (Microflown) con la sonda del tipo p-p que es la tecnología aceptada internacionalmente al tener estándares de ensayo definidos [45] y [13]. Lo publicado hasta el momento, parecía contraponer ambos tipos de tecnologías de sondas de intensidad. En estos artículos realmente se relacionan con objetividad las ventajas de una tecnología frente a la otra, que se pueden resumir en que la sonda del tipo p-u es más precisa cuando existen fuentes de ruido externas que aumentan el índice presión intensidad, y la sonda del tipo p-p se comporta con mayor precisión cuando el campo sonoro es más reactivo.

Realmente, lo más fructífero de estos últimos años, han sido las múltiples aplicaciones de la medida de la intensidad sonora que se han publicado, independientemente de la tecnología utilizada. Las medidas de máquinas o instalaciones con la finalidad de medir su potencia sonora e identificar simultáneamente las fuentes de ruido son las más habituales. Malcolm J. Crocker tiene un número importante de artículos y ponencias durante los últimos diez años, en el año 2004 publicó un interesante trabajo aplicado a equipos de aire acondicionado de uso residencial [11]. Pero hay que decir que esta documentación es abundante y variada en cuanto a las aplicaciones y a la cantidad de autores.

Otra aplicación interesante es la Holografía en el campo cercano (NAH) realizada con un array de sondas Microflown, donde se visualiza en tiempo real el

campo acústico de una fuente de ruido no estacionario [12]. Esta tecnología implementa la posibilidad de tener “una cámara acústica”, que al modificarse las condiciones de carga o velocidad, por ejemplo de un motor, se aprecia casi instantáneamente la variación de su emisión sonora, figura 2.27.

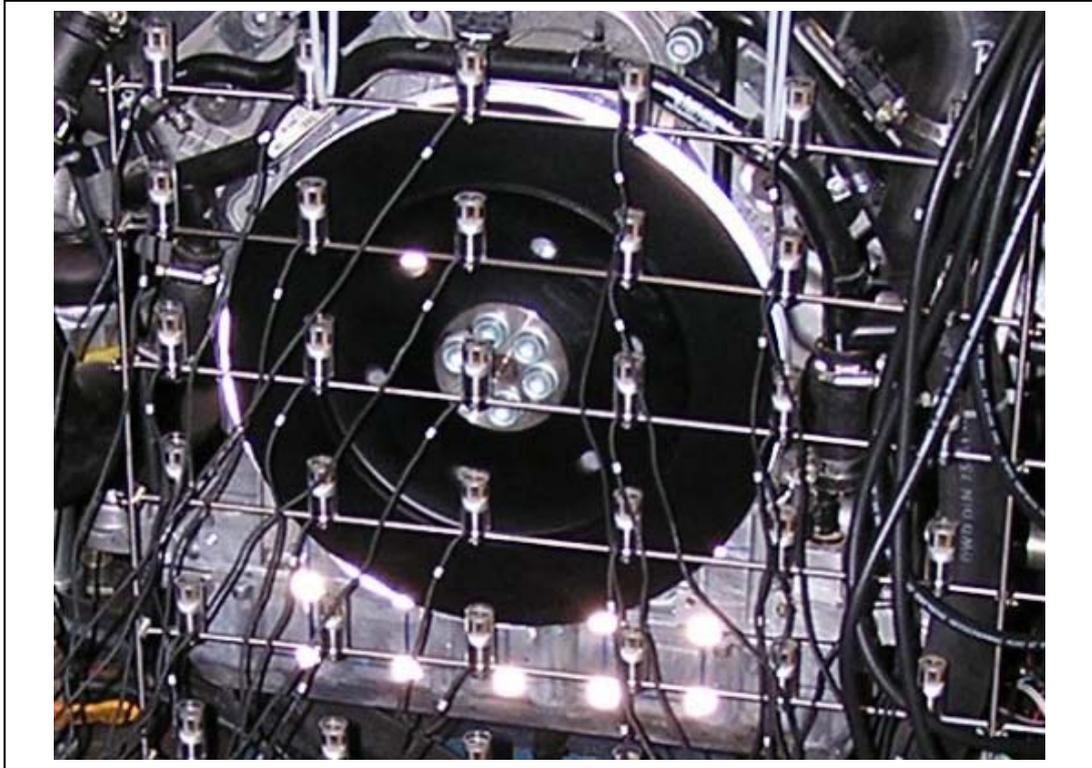


Figura 2.27. - Sistema de holografía en campo cercano (NAH) con array de Microflowsns.

El Nearfield Acoustical Holography (NAH) es una tecnología con ciertas ventajas respecto de otra más reciente conocida como Beamforming, que se utiliza para medidas en el campo lejano con limitaciones en frecuencia y con un rango dinámico pequeño. El Beamforming es una técnica de medida muy espectacular, ya que permite visualizar las fuentes de ruido en un campo sonoro no estacionario de una máquina en movimiento, por ejemplo, un automóvil. La última patente relacionada con este procedimiento de medida, data de agosto del 2006, y fue realizado por Jacob J. Christensen y J. Hald para Brüel & Kjaer, utilizando un array de micrófonos.

Pero precisamente las limitaciones de un método son las ventajas del otro, por lo que una combinación de ambas técnicas puede resultar muy útil al cubrir todo el ancho de banda en frecuencia, como propone J. Hald [33], en su artículo *An Integrated NAH/Beamforming Solution for Efficient Broad-Band Noise Source*

Location, publicado en el año 2005. Resulta interesante la comparación realizada a varias frecuencias entre las medidas adquiridas por medio de Holografía, Beamforming y una sonda de intensidad del tipo p-p, véase figura 2.28.

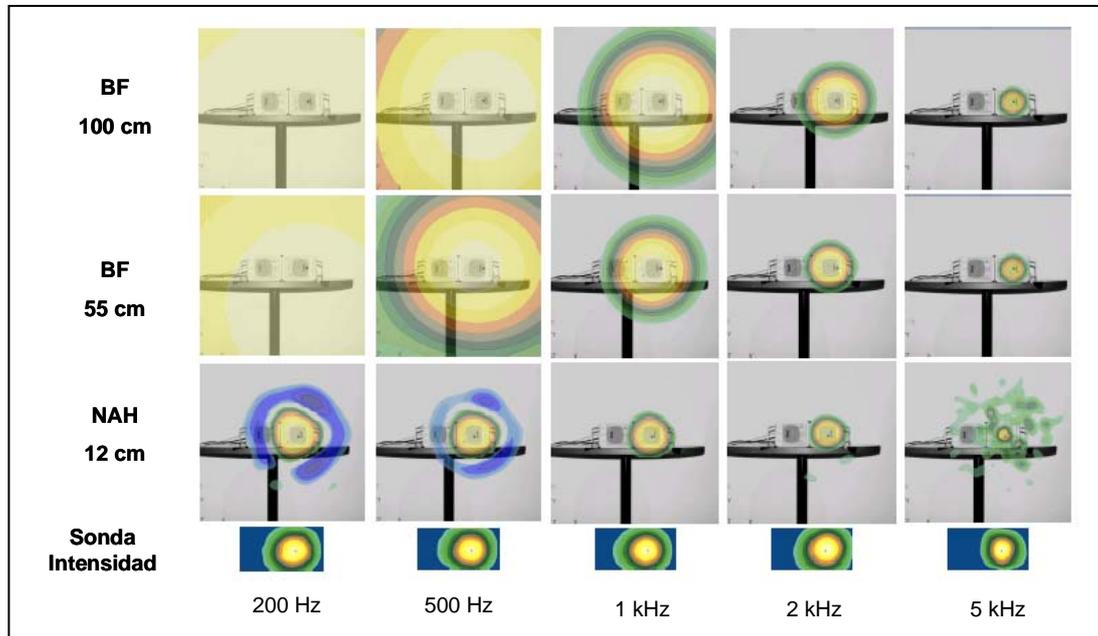


Figura 2.28. - Resultados obtenidos de la medida de un altavoz utilizando: Beamforming a 100 cm y a 55 cm, NAH a 12 cm y con una sonda de intensidad tipo p-p.

La aplicación de las medidas de intensidad sonora desglosada en sus dos factores, presión sonora y velocidad de las partículas del aire, tiene en la actualidad un gran interés para el sector de fabricantes de automóviles. El principio de reciprocidad se utiliza para identificar la emisión sonora de cada uno de los paneles que constituyen el habitáculo del automóvil. Existen dos procedimientos de medida: el método de la ventana con una sonda del tipo p-p, y la medida de la velocidad de las partículas directamente con una sonda del tipo p-u o un interferómetro láser.

El método de la ventana resulta muy laborioso ya que es necesario introducir material absorbente que recubra todas las superficies excepto el área a medir. La utilización de sensores de tipo p-u parece disminuir el tiempo necesario para valorar el habitáculo de un vehículo, como se muestra en el artículo publicado en el año 2004 por Oliver Woll y Roland Sottek [92]. Igualmente Hans-Elias de Bree y Sébastien Chaigne proponen un método similar utilizando los sensores Microflown [14].

En la actualidad se están desarrollando algunas aplicaciones de “cámaras acústicas” que pueden facilitar el estudio de la generación de fuentes de ruido en

máquinas en general con medidas realizadas in situ. En la figura 2.29 se muestran dos imágenes de este tipo de tecnología desarrolladas a partir de transductores diferentes.



Figura 2.29.- Dos arrays de transductores de tecnología diferente utilizados para el estudio de campos sonoros. A la izquierda construido con sensores microflow y a la derecha con micrófonos.

Otro campo de investigación interesante consiste en determinar la intensidad sonora en el espacio. La representación gráfica permite visualizar la propagación del campo acústico. Se puede detectar las zonas turbulentas en la proximidad de objetos, la radiación en el campo cercado de fuentes sonoras, la dispersión, etc. En esta línea, Stefan Weyna publicó en el año 2005, dos artículos donde se puede visualizar el campo sonoro a partir de la información de un parámetro vectorial como es la velocidad de las partículas, medida utilizando tecnología Microflow [87] y [88]. En la figura 2.30 se muestra los resultados obtenidos por Stefan Weyna.

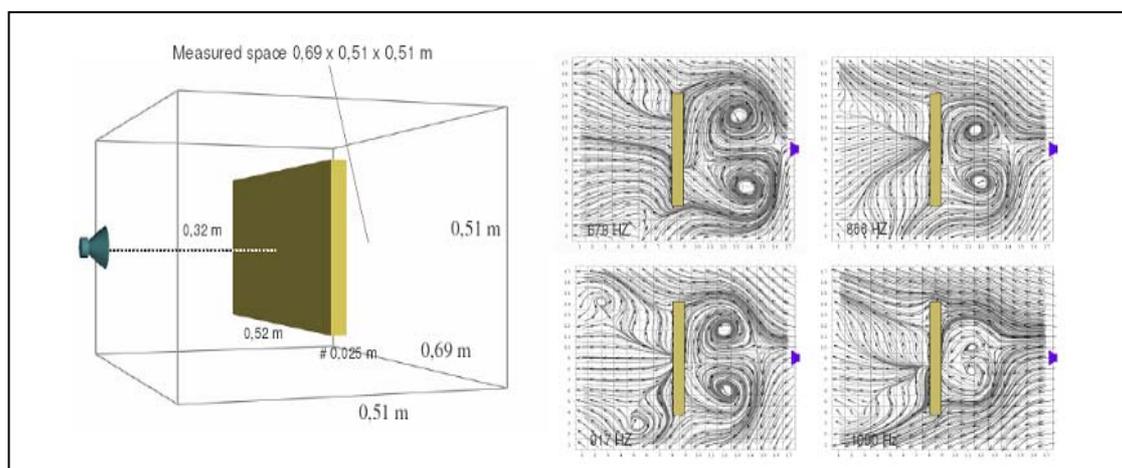


Figura 2.30.- Distribución del campo sonoro alrededor de un plato rectangular a las frecuencias de 678 Hz, 866 Hz, 917 Hz y 1090 Hz.

La última tecnología en medida de intensidad sonora es un sensor óptico que posee limitaciones importantes en la precisión y en el ancho de banda que puede analizar. Sin embargo, es una tecnología que puede tener un desarrollo futuro como lo han tenido el resto, figura 2.31.

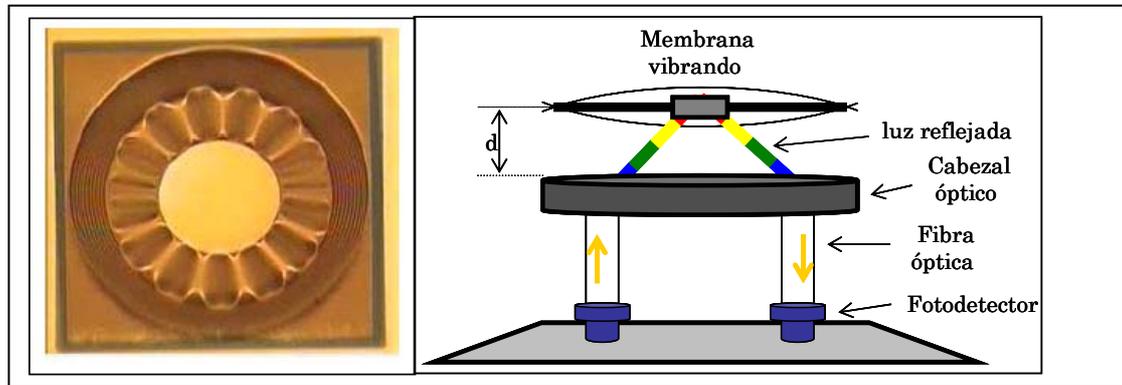


Figura 2.31. - La figura muestra el principio de funcionamiento de la sonda de intensidad óptica. A la izquierda una imagen ampliada de la membrana y del elemento reflectante y a la derecha un esquema funcional del transductor.

Ese tipo de sonda mide la velocidad de las partículas basándose en una membrana que es sensible a la variación de la presión local debida a un campo acústico. Lo curioso de esta tecnología es que en el centro de la membrana existe un elemento de dimensión puntual que permite la reflexión de la luz. Un cabezal recibe a través de una fibra óptica la señal luminosa de un LED, que es proyectada como un rayo laser contra la membrana, reflejándose en la superficie de ésta. Finalmente, la señal de intensidad de luz modulada por el efecto Doppler se convierte en una señal eléctrica. Existen varias publicaciones recientes que relacionan y comparan los resultados obtenidos con este tipo de sonda con respecto a los obtenidos con una sonda del tipo p-p. Una ponencia presentada por Y. Kahana en el congreso *Proceedings of Acoustics*, celebrado en Noviembre de 2005 en Busselton (Australia) [54], destaca la utilización de este tipo de sonda para medir en presencia de fuertes campos electromagnéticos.

Capítulo 3

FUNDAMENTOS DE LA MEDIDA DE LA INTENSIDAD SONORA

3.1.- Introducción

Cuando Lord Rayleigh publicó su libro *“La teoría del sonido”* en 1878, se establecieron los fundamentos de la acústica moderna. La intensidad sonora es la base de esa teoría, pero han sido necesarios casi cien años para conseguir un método práctico que permita su medida.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el nacimiento de la electrónica a principios del siglo pasado fue el factor clave que impulsó de forma significativa el desarrollo de la instrumentación de medida. Las piedras angulares fueron, el amplificador de triodo inventado por L. de Forest en 1906 y el primer micrófono de condensador diseñado por E.C. Wenten en 1915. La medida de la intensidad sonora se llevó a cabo por primera vez en 1932, cuando H.F. Olson patentó su sistema de medida. Sin embargo, el invento tenía considerables limitaciones técnicas que impedía su uso fuera del laboratorio.

Desde 1932 hasta finales de los años setenta no tiene lugar ninguna innovación tecnológica que permita el avance de la medida de la intensidad sonora. El salto técnico lo origina el desarrollo de la tecnología digital, poniendo fin a la tecnología analógica imperante. Con el desarrollo de la tecnología digital en el último cuarto del siglo pasado, los investigadores J.Y. Chung y F. J. Fahy, utilizaron

equipos multicanal para el procesado de señal en tiempo real, consiguiendo medir la intensidad sonora con precisión aceptable.

En el año 1977 se realiza la primera medida fiable, utilizando dos micrófonos enfrentados y dando lugar a la primera sonda de intensidad. La implementación de esta técnica en la investigación se realiza de forma rápida, aunque su aplicación en la industria tiene lugar de forma más lenta, debido fundamentalmente a su elevado coste y a que es una tecnología difícil de utilizar.

3.2.- Definición y propiedades de los parámetros acústicos

3.2.1.-Presión e intensidad sonora

La presión sonora es el parámetro clásico en las medidas acústicas. Durante bastante tiempo se ha determinado si una máquina era más o menos ruidosa, obteniendo su potencia acústica a partir de ella. Pero la presión sonora es una magnitud de carácter escalar, que depende de la potencia acústica de la fuente y del medio de propagación. Por el contrario, la intensidad sonora tiene carácter vectorial y depende sólo de la potencia de la fuente. El campo sonoro, o “ambiente acústico”, influye en la precisión de la medida, en la mayoría de los casos es necesario tenerlo en cuenta para evitar errores de procedimiento. En la figura 3.1, se muestra como la temperatura en un punto de una habitación depende: de la potencia calorífica generada por la estufa, de las dimensiones de la sala y de sus características térmicas.

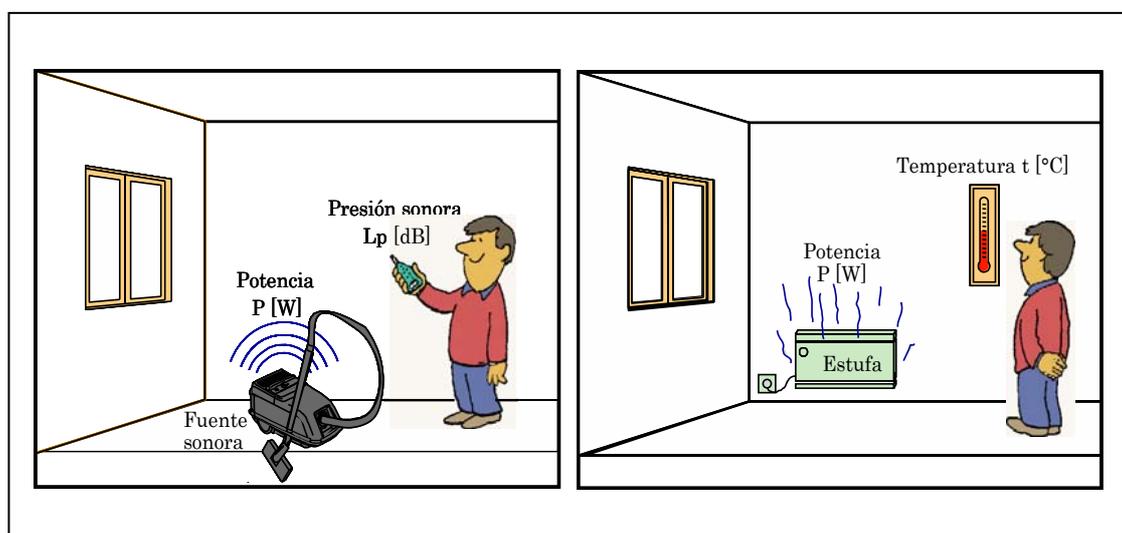


Figura 3.1.- Analogía entre la energía acústica y la calorífica.

Análogamente, el nivel de presión sonora medido depende: de la potencia sonora de la aspiradora y del campo sonoro generado en el recinto, que depende a su vez de las dimensiones de la sala y de sus características acústicas.

Es importante resaltar el carácter escalar de la presión sonora, circunstancia ésta, que permite determinar el grado de molestia del ruido. Conocer el riesgo de pérdida auditiva de los usuarios de las máquinas es importante para los ingenieros que las diseñan, pero no aporta suficiente información respecto de las causas generadoras del ruido. Frente a la medida de la presión sonora surge la medida de la intensidad sonora, que siendo un parámetro de carácter vectorial, aporta grandes ventajas en el análisis y control de los niveles de ruido de las distintas fuentes.

La intensidad sonora por definición cuantifica la cantidad de energía acústica que fluye en una zona concreta del campo sonoro por unidad de área. La intensidad sonora se representa como un vector perpendicular a la superficie en estudio. Por lo tanto, la medida de este parámetro aporta información sobre la cantidad de energía que pasa a través de un área definida (3.1), y además, sobre la dirección y sentido en el que fluye la energía.

$$\text{Flujo de energía} = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}} \quad \Rightarrow \quad W = \int_S \vec{I} ds \quad (3.1)$$

Si no existe flujo neto de energía en un punto, la intensidad sonora será cero. Es decir, las condiciones del campo sonoro van a ser determinantes en la medida, bien por la existencia de un campo “turbulento”, o por fuentes antagónicas que hacen fluir la energía en la misma dirección pero en sentido contrario.

3.2.2.-Potencia sonora

Una fuente sonora se caracteriza por la potencia acústica que emite, manifestándose ésta, en forma de presión sonora que es captada por el oído humano. Resulta obvio que la potencia acústica es la causa y la presión sonora el efecto.

Recordando la analogía de la figura 3.1, se comprende fácilmente que para la viñeta del radiador eléctrico, la temperatura es el efecto, siendo la cantidad de energía por unidad de área y tiempo radiada por la estufa la causa. Por lo tanto, la potencia acústica de la aspiradora de la misma figura es la causa y el nivel de presión sonora que mide un sonómetro en un punto determinado el efecto.

La caracterización del nivel de ruido que emite una fuente se puede obtener calculando su potencia acústica. Existen dos procedimientos experimentales para determinar la potencia: mediante la medición de la presión o mediante la medición directa de la intensidad sonora. La medida de la presión sonora depende del campo sonoro, es decir, del medio de propagación. Si el campo sonoro se puede considerar libre o reverberante ideal, la potencia puede determinarse a partir de la medida de presión; pero si no es así, solo podrá determinarse con un cierto grado de precisión a partir de la medida de la intensidad sonora.

3.2.3.- Relación entre presión, intensidad y potencia sonora

La intensidad sonora es un vector que describe la magnitud y dirección del flujo neto de energía acústica a través de una determinada superficie. Por lo tanto, las unidades son de energía por unidad de tiempo y superficie, es decir, vatios/m². En la figura 3.2, se muestra la relación existente entre potencia W , intensidad I y presión sonora p .

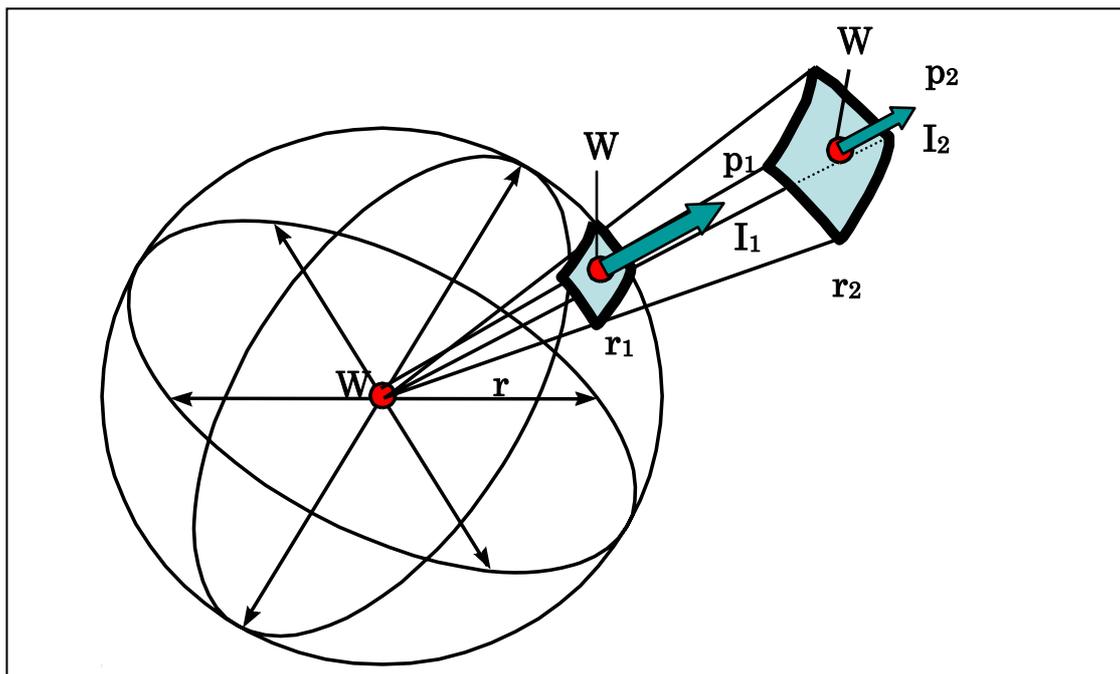


Figura 3.2.- Cuando la propagación del campo sonoro es en campo libre, la presión y la intensidad sonora disminuyen con la distancia; mientras que, la potencia permanece constante al ser independiente del punto de medida.

La potencia acústica es independiente de la distancia a la que se mide, ya que al alejarse de la fuente, la presión y la intensidad disminuye inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, aumentando en igual proporción la

superficie. La relación entre las tres magnitudes, en condiciones de campo libre, es la expresada en (3.2), donde se puede comprobar la ley de cuadrados inversos.

$$I_r = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r_i^2} = \frac{p_i^2}{\rho \cdot c} \quad (3.2)$$

Siendo, ρ la densidad del aire en kg/m³ y c la velocidad del sonido en m/s. El producto de $\rho \cdot c$ representa la impedancia específica del medio donde se propaga el sonido; y su valor en el aire, dependiendo de las condiciones atmosféricas, es aproximadamente de 400 N·s/m³. Considerando la propagación de una onda sonora en el espacio, así como, dos puntos que cumplan la condición de estar situados uno de ellos al doble de distancia respecto de la fuente que el otro, las intensidades sonoras respectivas serán:

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

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

$$I_{r_2} = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot (2 \cdot r_1)^2} = \frac{W}{16 \cdot \pi \cdot r_1^2} \qquad I_{r_1} = 4 \cdot I_{r_2}$$

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

3.2.4.-Unidades de medida de los parámetros relacionados con la intensidad sonora y niveles de referencia

Los niveles de presión sonora L_p , intensidad sonora L_I y potencia sonora L_w , se expresan en decibelios. El decibelio por definición es diez veces el logaritmo entre una magnitud determinada frente a otra de referencia. En algunos casos especiales se utiliza el belio como unidad de medida (1 belio= 10 dB), aunque en la mayoría de los casos no resulta práctico su uso. El nivel de presión sonora se obtiene mediante la expresión (3.3),

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{P_0^2} \quad (3.3)$$

La referencia P_0 se corresponde con el umbral de audición, representando la mínima variación de presión sonora respecto de la presión atmosférica que el oído humano puede captar como una señal sonora, su valor es de $20 \mu\text{Pa}$. La utilización del decibelio como unidad de medida para la presión sonora, se debe a que la unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades es demasiado grande. Además, la escala logarítmica se ajusta mejor a las características de percepción del oído humano y resulta más práctica para medir los parámetros relacionados con el sonido, ya que como se puede comprobar, la escala queda comprimida en aproximadamente 140 unidades o divisiones, figura 3.3. No obstante, siempre hay que tener en cuenta el carácter logarítmico del decibelio a la hora de operar matemáticamente con él.

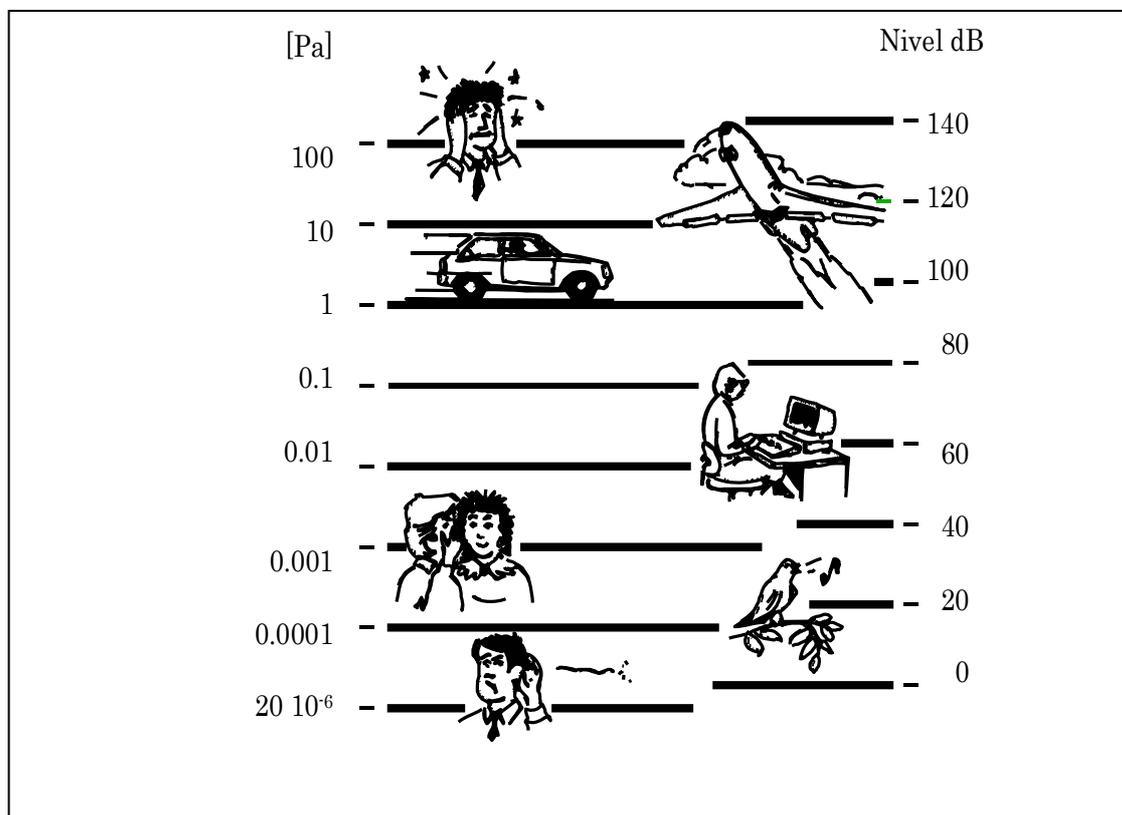


Figura 3.3. - Comparación de las escalas en pascales y en decibelios.

Los niveles de referencia del resto de parámetros mencionados se determinan, de forma aproximada, a partir del nivel de referencia de la presión sonora medida en condiciones de campo libre. Para ello, se igualan los niveles de las magnitudes de presión sonora e intensidad sonora. Esto quiere decir que en condiciones de campo libre, obtendríamos el mismo valor en decibelios tanto si medimos la presión como la intensidad sonora en la dirección de propagación.

El valor de referencia es aproximado para unas determinadas condiciones ambientales, ya que al redondear los valores a un número entero, se produce una ligera diferencia. Esta desviación depende de la impedancia del medio $\rho \cdot c$. Se producen variaciones significativas de la impedancia cuando se realizan medidas a elevada altitud, en el resto de los casos se puede considerar despreciable. En condiciones de campo libre para una impedancia de $400 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$, se cumple que el nivel de presión sonora es igual al nivel de intensidad, $L_p = L_I$.

Pero si consideramos la impedancia específica real teniendo en cuenta la temperatura ambiente y la presión atmosférica, se produce un significativo error entre los niveles de las distintas magnitudes medidas en condiciones de campo libre. Por ejemplo, la impedancia del aire como medio de transmisión de una onda sonora a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1013 mbar , es de $415 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$, verificándose que,

$$L_p = L_I + 0,16 \text{ dB}$$

En la tabla 3.1 se muestran los valores de referencia de las distintas magnitudes relacionadas con el sonido, así como las ecuaciones que las definen. Las condiciones atmosféricas deben tenerse en cuenta en el proceso de calibración de la sonda de intensidad antes de realizar las medidas.

Tabla 3.1.- Expresiones y niveles de referencia de las magnitudes utilizadas en acústica.

	EXPRESIÓN EN dB	REFERENCIA
PRESIÓN SONORA	$L_p = 10 \log \frac{p^2}{P_0^2}$	$P_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$
INTENSIDAD SONORA	$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$	$I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ w}/\text{m}^2$
POTENCIA SONORA	$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}$	$W_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ w}$

3.2.5.- Algunas propiedades de la intensidad sonora

La intensidad sonora es una magnitud de carácter vectorial. Por lo tanto, a la hora de valorar una medida debe tenerse en cuenta: su módulo, la dirección de propagación y el sentido en el que fluye la energía en dicha dirección.

Como parámetro acústico, la intensidad sonora posee algunas propiedades interesantes. A continuación se describen las más relevantes acompañadas de un ejemplo que facilite su comprensión.

1ª. El nivel de presión sonora e intensidad sonora coinciden en condiciones de campo libre.

La coincidencia o no, entre el nivel de presión y el de intensidad define las condiciones del campo donde se realiza la medida. Si ambos niveles son iguales se está en condiciones de campo libre, pero si la diferencia es importante se puede afirmar que el campo es claramente reverberante.

Para ilustrar esta propiedad con un ejemplo, supongamos un altavoz que posee una potencia sonora de 0,02 vatios suspendido en el interior de una cámara anecóica, que es un recinto donde se genera un campo sonoro de características muy próximo al campo libre. Si se pretende determinar el nivel de presión e intensidad a un metro de la fuente, es necesario utilizar la expresión (3.2).

$$I_r = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{p_{RMS}^2}{\rho \cdot c}$$

En primer lugar, se determina la intensidad sonora,

$$I = \frac{W}{A} = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{0,02}{4 \cdot \pi \cdot 1^2} = 1,59 \cdot 10^{-3} \text{ w/m}^2$$

Siendo el nivel de intensidad sonora,

$$L_I = 10 \log \left[\frac{1,59 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-12}} \right] = 92,01 \text{ dB}$$

En segundo lugar, se calcula la presión sonora,

$$p_{RMS}^2 = \rho \cdot c \cdot \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = 400 \cdot \frac{0,02}{4 \cdot \pi \cdot 1^2} = 0,637 \text{ Pa}^2$$

Siendo el nivel de presión sonora,

$$L_p = 10 \log \left[\frac{0,637}{(20 \cdot 10^{-6})^2} \right] = 92,01 \text{ dB}$$

2ª. El vector intensidad puede ser positivo o negativo según el sentido en el que fluye la energía en una dirección dada.

De forma diferente al nivel de presión sonora, el nivel de intensidad sonora será positivo o negativo en función del sentido de propagación del campo. El sentido queda definido al orientar la sonda de intensidad. Es necesario saber cual es la orientación positiva de la sonda para interpretar el signo de la intensidad que se está midiendo.

Además, se puede dar la circunstancia de un valor negativo del nivel de intensidad sonora, debido exclusivamente a un sonido de pequeña amplitud. De tal forma, que al aplicar la expresión que permite obtener el nivel de intensidad sonora de la tabla 3.1, si la intensidad obtenida es de magnitud menor que el valor de la referencia, el cociente es inferior a la unidad y su logaritmo negativo.

Resulta necesario conocer en la instrumentación de medida, como distingue el equipo el valor positivo o negativo debido al nivel en decibelios. Igualmente, de que forma distingue el signo positivo o negativo de la intensidad debido al sentido en el que fluye la energía en el campo sonoro. Normalmente, se suele anteponer al valor de la intensidad sonora el signo positivo o negativo cuando la magnitud medida es más pequeña que el valor de referencia (*Por ejemplo, $L_I = \pm 80$ dB*).

Por otra parte, los equipos comerciales que existen actualmente en el mercado indican el sentido de propagación del flujo de la energía acústica, en una dirección dada, colocando el signo entre paréntesis al final del valor de la intensidad (*Por ejemplo, $L_I = 80 (\pm)$ dB*).

3ª. Cuando la energía fluye en el mismo sentido para una dirección dada, la adición de niveles de intensidad sonora se hace de igual forma a la adición de niveles de presión sonora.

La suma de niveles de intensidad sonora se determina teniendo en cuenta la suma de magnitudes de carácter logarítmico siempre que la energía sonora fluye en el mismo sentido, como se hace con la suma de niveles de presión sonora. Por ejemplo, si se desea sumar dos fuentes sonoras que generan un

nivel de intensidad de 80 dB y 75 dB en una dirección determinada y con el mismo sentido, se procede de la siguiente forma:

$$L_{I_1} = 80 \text{ dB}$$

$$L_{I_2} = 75 \text{ dB}$$

Se obtiene las intensidades sonoras,

$$80 = 10 \log \left[\frac{I_1}{I_0} \right] = 10 \log \left[\frac{I_1}{10^{-12}} \right] \quad 75 = 10 \log \left[\frac{I_2}{I_0} \right] = 10 \log \left[\frac{I_2}{10^{-12}} \right]$$

$$I_1 = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{80}{10}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ w/m}^2 \quad I_2 = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{75}{10}} = 3,16 \cdot 10^{-5} \text{ w/m}^2$$

Se suman las intensidades y se obtiene su nivel en decibelios,

$$L_{I_1} + L_{I_2} = 10 \log \frac{10^{-4} + 3,16 \cdot 10^{-5}}{10^{-12}} = 81,19 \text{ dB}$$

4ª. Para obtener el nivel de intensidad sonora de fuentes que generan flujos de energía acústica en la misma dirección, pero en sentido contrario, es necesario hacer la sustracción de niveles en términos de intensidad.

Para explicar esta propiedad se supone una fuente que genera un nivel de intensidad de 80 dB y otra fuente que emite su energía sonora en la misma dirección pero en sentido contrario con un nivel de 77 dB, según se muestra en la figura 3.4.

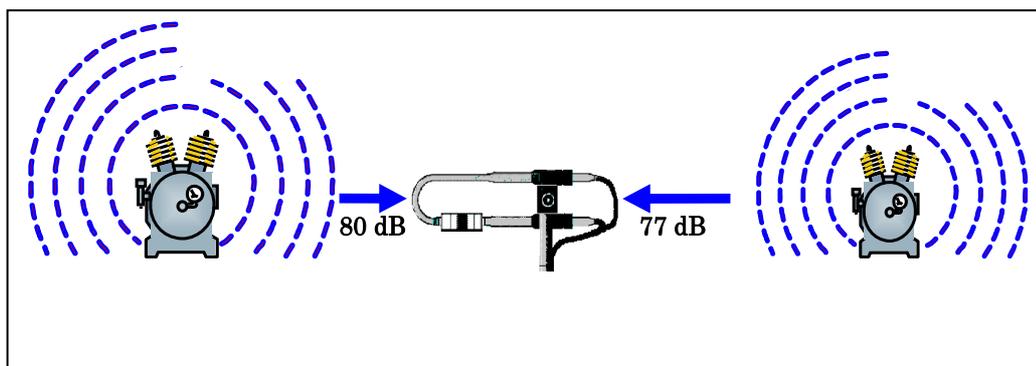


Figura 3.4.- Nivel de intensidad resultante entre dos fuentes que emiten energía sonora en términos de intensidad en la misma dirección, pero en sentido contrario.

Para obtener el nivel de intensidad sonora resultante se puede realizar el cálculo matemático exacto como se muestra en la figura 3.5.

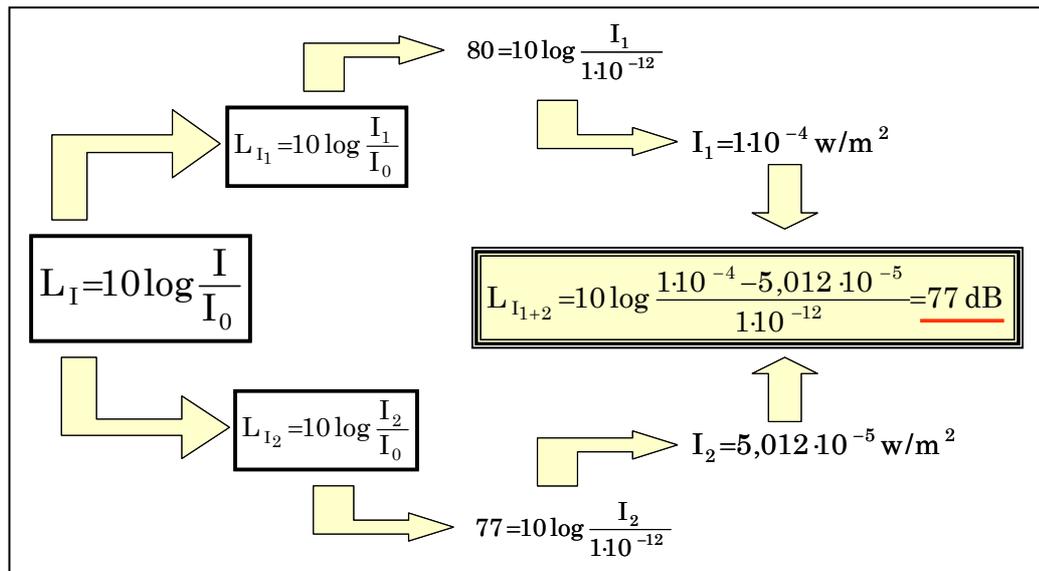


Figura 3.5.- Cálculo numérico del nivel de intensidad resultante por la acción de dos fuentes.

Otro procedimiento consiste en descomponer el nivel de la fuente mayor en dos niveles de forma que uno de ellos se corresponda con el nivel de la fuente menor, anulándose ambos niveles. Sabiendo que el incremento de 3 dB representa duplicar la energía de un nivel I respecto de otro, se puede realizar un cálculo aproximado muy simple. En primer lugar se descompone el nivel de la fuente mayor en dos niveles de 77 dB, que como se sabe suman 80 dB. En segundo lugar, uno de los niveles resultante de la descomposición, anula el nivel sonoro de la fuente que aporta la energía en sentido contrario, como se muestra gráficamente en la figura 3.6.

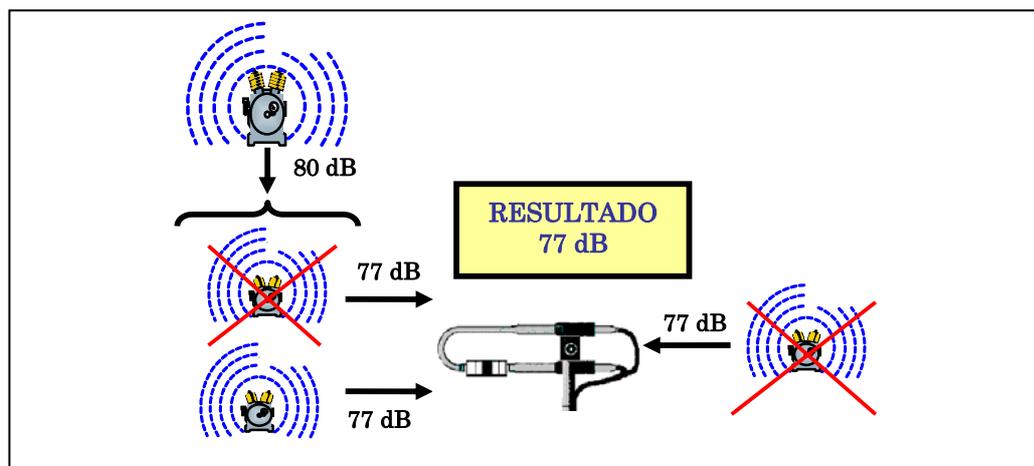


Figura 3.6.- Procedimiento aproximado de cálculo de la intensidad resultante en un punto del espacio, por la acción de dos fuentes que emiten energía sonora en términos de intensidad en la misma dirección pero en sentido contrario.

Utilizando este procedimiento gráfico también se intuye el sentido en el que fluirá la energía resultante por la acción de ambas fuentes.

3.3.- Principios básicos sobre la intensidad sonora

Las variables de las que depende la intensidad sonora fueron definidas por Lord Rayleigh a finales del siglo XIX. Para obtenerla es necesario medir, además de la presión sonora, la velocidad de las partículas del aire. Considerando la definición de la intensidad instantánea en la dirección r ,

$$I_{r_{inst}} = \frac{dEr}{dt \cdot dA} \quad (3.4)$$

Donde, dEr es la energía que fluye a través del diferencial de área dA perpendicular a la dirección de propagación en el periodo de tiempo dt . La energía, como se ha mencionado anteriormente, puede fluir en ambos sentidos para una misma dirección, siendo la intensidad sonora neta la que resulte del balance de energías entrantes y salientes a través del área considerada, como se muestra en la figura 3.7.

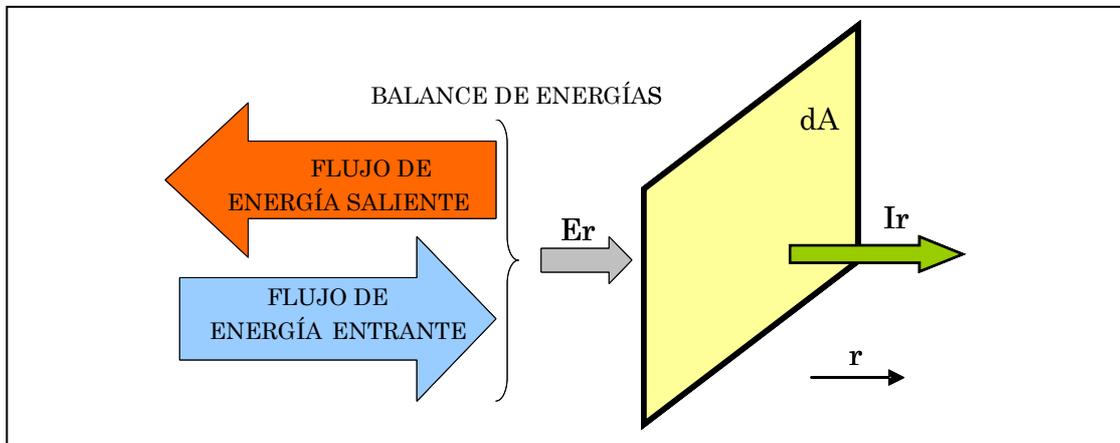


Figura 3.7.- Balance del flujo de energía acústica a través de una superficie.

Por otra parte, la energía circulante es igual a la magnitud del trabajo realizado por la fuerza Fr por el desplazamiento dr .

$$dEr = Fr \cdot dr = p_t \cdot dA \cdot dt$$

La presión total p_t esta compuesta por dos componentes: la presión atmosférica p_a y la variación que se produce respecto de ella Δp_a . Luego, $p_t = p_a + \Delta p_a$.

El término relacionado con la presión atmosférica representa la componente continua de la presión total, mientras que el incremento de presión respecto de la atmosférica, aporta a la suma una componente alterna, figura 3.8.

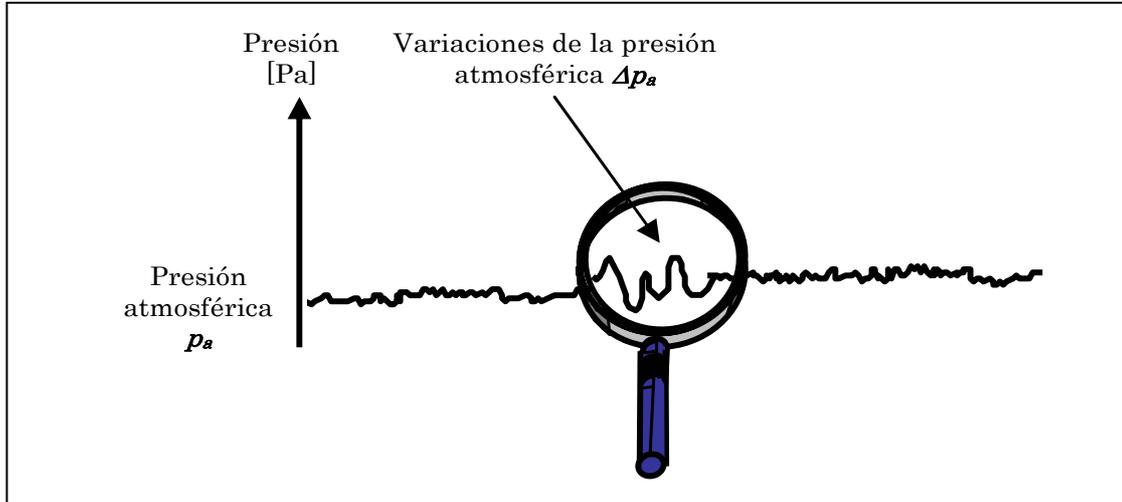


Figura 3.8.- Componentes de la presión sonora en un punto del espacio y en un lugar geográfico.

Teniendo en cuenta la expresión de la intensidad instantánea (3.4), y sustituyendo la presión total:

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

Considerando que \mathbf{ur} representa la velocidad de las partículas del aire, y llamando simplemente p , al incremento de presión respecto de la presión atmosférica Δp_a , queda:

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

La componente continua de la intensidad instantánea tiene un valor promedio cero, ya que no aporta flujo neto de energía. El otro término es igual al producto de la presión sonora instantánea y la correspondiente velocidad de las partículas en la dirección \mathbf{r} . Es decir, en un campo sonoro donde existe un flujo neto de energía, el vector intensidad es igual al resultado de multiplicar la presión sonora por la velocidad instantánea de las partículas del medio, promediado en el tiempo, en una misma posición de medida y en una dirección \mathbf{r} determinada (3.5).

$$\bar{I}_r = \overline{p(t) \cdot \mathbf{ur}(t)} \quad (3.5)$$

La expresión anterior se cumple siempre que exista variación de presión $p(t)$, respecto de la presión atmosférica, y que la velocidad de las partículas no contenga una componente continua. Es decir, que se desplacen con velocidad constante en una misma dirección, en cuyo caso no existirá flujo neto de energía acústica. En el espacio, el vector intensidad puede descomponerse respecto de un sistema de referencia ortogonal en tres direcciones, como se muestra en la siguiente expresión:

$$\bar{I} = \overline{p \cdot u_x} + \overline{p \cdot u_y} + \overline{p \cdot u_z} = \overline{p \cdot \vec{u}}$$

Suponiendo un campo sonoro sinusoidal, donde:

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

$$\vec{u}(t) = \vec{u}_0 \cdot \cos(\omega t + \phi_2)$$

Sustituyendo en (3.5),

$$\bar{I}_r = \overline{p(t) \cdot \vec{u}(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T p_0 \cdot u_0 \cdot \cos(\omega t + \phi_1) \cdot \cos(\omega t + \phi_2) dt =$$

Teniendo en cuenta que,

$$2[\cos(\alpha + \beta) \cdot \cos(\alpha + \gamma)] = \cos(2\alpha + \beta + \gamma) + \cos(\beta - \gamma)$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \bar{I}_r &= \frac{1}{T} \int_0^T p_0 \cdot u_0 \cdot \frac{1}{2} (\cos(2\omega t + \phi_1 + \phi_2) + \cos(\phi_1 - \phi_2)) dt = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{T} \cdot p_0 \cdot \vec{u}_0 \cdot \int_0^T \cos(2\omega t + \phi_1 + \phi_2) dt + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{T} \cdot p_0 \cdot \vec{u}_0 \int_0^T \cos(\phi_1 - \phi_2) dt \end{aligned}$$

Para un valor de T lo suficientemente grande, el primer sumando se puede despreciar, quedando,

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

$$\bar{I} = p_{RMS} \cdot \vec{u}_{RMS} \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (3.6)$$

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

Analizando la expresión (3.6), se puede concluir que la intensidad sonora no solo depende de la presión y la velocidad de las partículas, sino que también depende del desfase de ambas señales. Para poder determinar la intensidad sonora es necesario un equipo de medida muy preciso en la determinación de la fase de dichas señales.

A la misma expresión se habría llegado utilizando la notación compleja.

$$p = p_0 \cdot e^{j(\omega t + \phi_1)} \quad \bar{u} = u_0 \cdot e^{j(\omega t + \phi_2)} \quad \bar{u}^* = u_0 \cdot e^{-j(\omega t + \phi_2)}$$

El producto de la señal de presión sonora por el conjugado de la señal de la velocidad de las partículas del aire tendrá una componente real y otra imaginaria. La intensidad sonora medida a partir del flujo neto de energía en la dirección \mathbf{r} , representa la componente activa y se corresponde con la parte real del espectro cruzado de las señales temporales.

$$\bar{I} = \text{Re} \left[\overline{p \cdot \bar{u}^*} \right] = \text{Re} \left[\frac{1}{2} p_0 \cdot u_0 \cdot e^{j(\omega t + \phi_1)} \cdot e^{-j(\omega t + \phi_2)} \right] = \text{Re} \left[\frac{1}{2} p_0 \cdot u_0 \cdot e^{j(\phi_1 - \phi_2)} \right]$$

$$\bar{I} = \frac{1}{2} p_0 \cdot u_0 \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

Sustituyendo el factor $\frac{1}{2}$ por los valores eficaces de las señales se llega igualmente a la expresión (3.6).

3.4.- Campos sonoros activos y reactivos

Un campo sonoro es una región del espacio donde se propaga el sonido. Se considera que un campo sonoro es libre cuando no existen reflexiones de sonido que puedan concurrir en un punto. Por el contrario, se considera que el campo sonoro es difuso o reverberante, cuando el sonido se refleja tantas veces como se emite en todas las direcciones con la misma probabilidad. La propagación del sonido implica un flujo neto de energía, luego es necesario que se den en menor o mayor grado las condiciones de campo libre. El campo sonoro define las condiciones en las que tiene

lugar la variación de la presión sonora en el espacio. Se considera que un campo sonoro es activo, cuando existe flujo de energía neto a través de una superficie. Por el contrario, se dice que un campo sonoro es reactivo puro, cuando no existe flujo de energía neto a través de dicha superficie. En este último caso, la energía fluye en un sentido atravesando la superficie definida, regresando posteriormente en sentido contrario. La energía se comporta en el campo sonoro de forma similar a como lo hace un resorte. Siendo, por lo tanto, la intensidad sonora nula.

En un campo sonoro libre ideal predomina de forma pura la componente activa, mientras que en un campo sonoro muy reverberante, la componente que domina es la reactiva. En general los campos sonoros tienen ambas componentes: la activa y la reactiva. Es decir, habrá una parte de energía que fluya en una o más direcciones a través del espacio; y otra parte de la energía sonora, que entre y salga en esa zona del espacio donde existe el campo sonoro.

3.4.1.- Ondas estacionarias en un tubo

Un campo sonoro reactivo se puede obtener por medio de un pistón que se desplaza en el interior de un tubo, comprimiendo el aire que contiene. El aire se comprime y se descomprime, debido a que el extremo se encuentra taponado con una superficie rígida y reflectante acústicamente. La combinación de las ondas reflejadas con las ondas incidentes, origina un modelo de presión con máximos y mínimos que se localizan a lo largo del tubo a distancia fija. Como toda la energía es reflejada en el extremo, la intensidad sonora neta es cero. En la figura 3.9, se aprecia como la señal de presión y de velocidad de las partículas se encuentran desfasadas 90 grados, y según la expresión (3.6), la intensidad tiene que ser necesariamente nula.

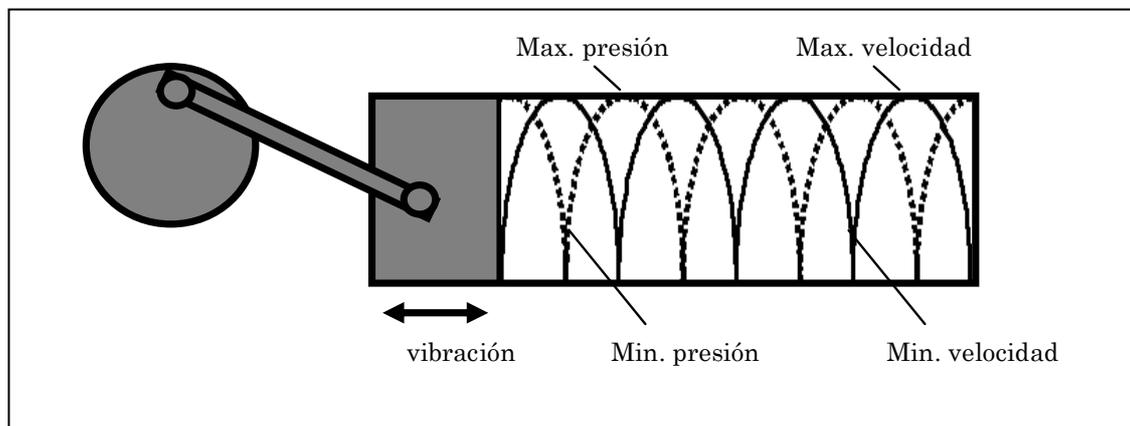


Figura 3.9.- El campo sonoro que se genera en el interior de un tubo de impedancia es reactivo puro.

En un campo reactivo puro, la energía que fluye en un sentido retorna nuevamente en sentido contrario con idéntico valor.

3.4.2.- Campo próximo y lejano de una fuente

Cuando se estudia el campo sonoro generado por una fuente en el espacio, podemos distinguir dos tipos diferentes, el campo próximo y el campo lejano. En la proximidad de una fuente sonora el aire actúa como un sistema masa-muelle, almacenando energía que circula con resultado neto cero. Esta zona recibe el nombre de campo próximo. Para determinar la potencia acústica de una fuente en esta zona, solamente se pueden realizar medidas de intensidad sonora. Si la distancia entre la fuente y la sonda de intensidad es muy pequeña, la medida estará también limitada.

Una de las propiedades de la intensidad sonora, es la distinción que se puede hacer respecto a su componente activa y reactiva en función de las características del campo sonoro. Una sonda de intensidad sonora mide la componente activa del campo sonoro en una determinada dirección e ignora la componente reactiva. En el campo próximo, habrá zonas donde la sonda medirá intensidad cero, ya que no tiene lugar ningún flujo neto de energía.

Las líneas que representan el campo acústico entran y salen en la proximidad de la superficie que vibra como se muestra la figura 3.10.

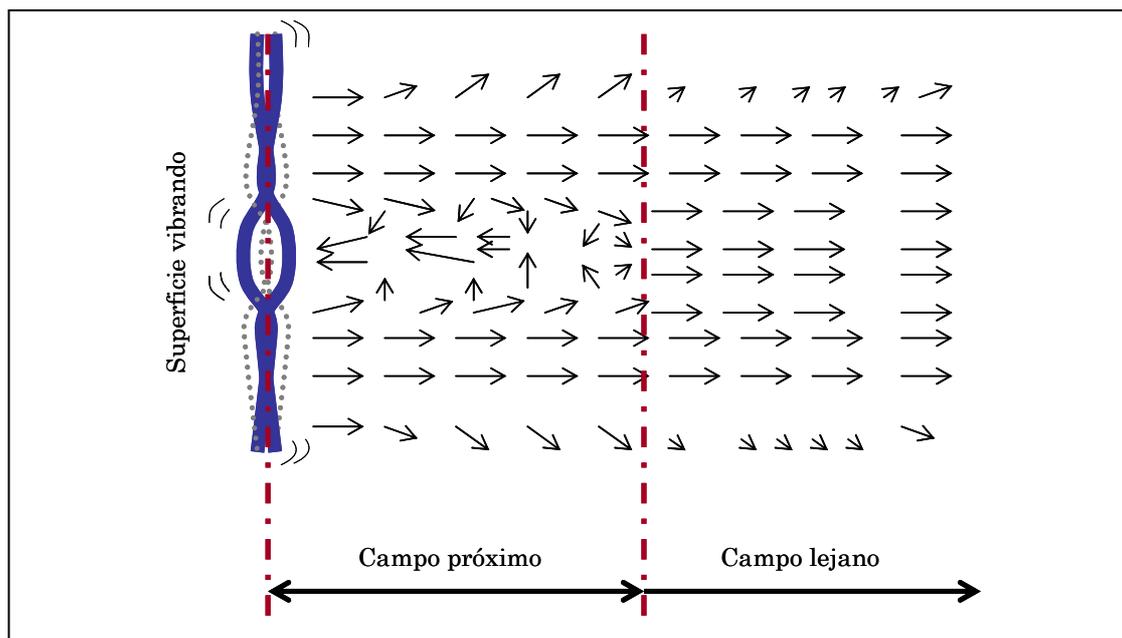


Figura 3.10.- Distribución del campo sonoro en la proximidad de una fuente que vibra.

Por otra parte, en el campo sonoro lejano se dan las condiciones de campo libre y es un ejemplo de un campo activo puro. Como lo es también la propagación de una onda plana, representada simbólicamente por las ondas que se generan al lanzar una piedra sobre el agua en calma de un estanque. La determinación de la potencia acústica a una distancia suficientemente lejos de la fuente se puede hacer midiendo la intensidad sonora, o bien, la presión sonora.

3.4.3.- Componentes activa y reactiva de la intensidad sonora

La presión sonora tiene carácter escalar, mientras que la velocidad de las partículas tiene carácter vectorial, pudiéndose descomponer en una componente activa en fase con la señal de presión y en una componente reactiva desfasada 90 grados con respecto a ella. Solamente la componente activa de la velocidad de las partículas multiplicada por la presión sonora en fase con ella, da un producto distinto de cero.

Resulta interesante la analogía que se puede establecer entre los parámetros acústicos y eléctricos definidos por la ley de Ohm. La velocidad de las partículas del aire representa la “intensidad de corriente”, la presión sonora “la diferencia de potencial eléctrico” y la impedancia del medio $\rho \cdot c$ “la resistencia eléctrica”, según se muestra en la expresión (3.7).

$$u = \frac{p}{\rho \cdot c} \quad (3.7)$$

El módulo de la intensidad sonora se puede obtener para condiciones de campo libre sustituyendo la expresión (3.7) en la expresión (3.5).

$$|\bar{I}| = \overline{p \cdot u} = p \frac{\overline{p}}{\rho \cdot c} = \frac{\overline{p^2}}{\rho \cdot c} = \frac{p_{RMS}^2}{\rho \cdot c} \quad (3.8)$$

Como se deduce de la expresión (3.8), la intensidad sonora se puede calcular a partir de la presión sonora al cuadrado dividido por la impedancia específica del medio si se dan las condiciones de campo libre. Igualmente, el valor de la intensidad sonora se obtiene haciendo el producto de la señal de la presión sonora por la velocidad de las partículas del aire, cuando la presión y la velocidad de las partículas se encuentran en fase.

En la figura 3.11, se ha representado en color verde la evolución temporal de la intensidad sonora y en color rojo su valor promedio. Apréciese en la figura, que la frecuencia de la intensidad sonora es el doble que la frecuencia de la presión y la velocidad de las partículas del aire, debido a la coincidencia de los signos de ambos parámetros, cuyo producto es siempre positivo para una determinada dirección de propagación de la onda.

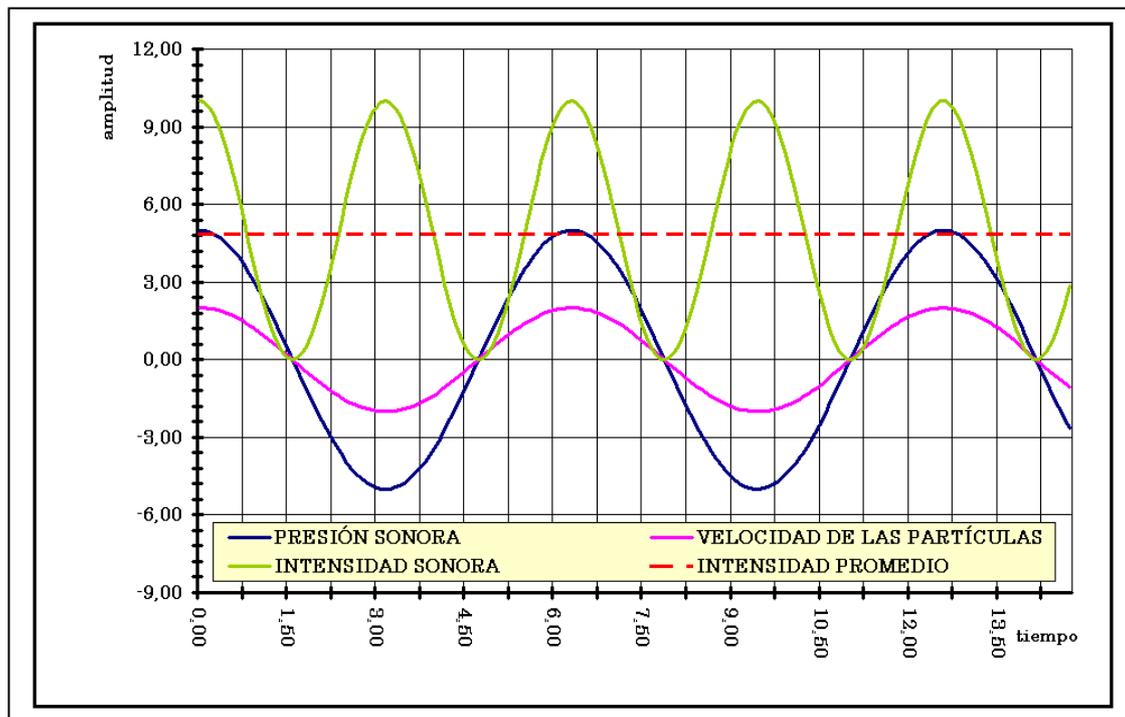


Figura 3.11.- El producto de la presión sonora por la velocidad de las partículas del medio en fase, permite obtener la intensidad sonora de un campo activo puro.

Por otra parte, en un campo sonoro reactivo puro la intensidad sonora es nula, ya que no existe flujo de energía, por ejemplo, en el caso de una onda estacionaria ideal donde la velocidad de las partículas está 90 grados desfasada con respecto a la presión sonora. Por lo tanto, la presión tendrá su máximo valor en la zona donde la velocidad de las partículas es cero, de igual forma, la velocidad de las partículas será máxima cuando la presión sonora sea nula.

En la figura 3.12 se muestra este desfase de 90 grados entre ambos parámetros. Multiplicando en cada momento ambas señales se obtiene la intensidad sonora instantánea. Dicha intensidad varía de forma sinusoidal en torno al eje de abscisas. Por lo tanto, al promediar la intensidad sonora entre valores positivos y negativos, el resultado es cero.

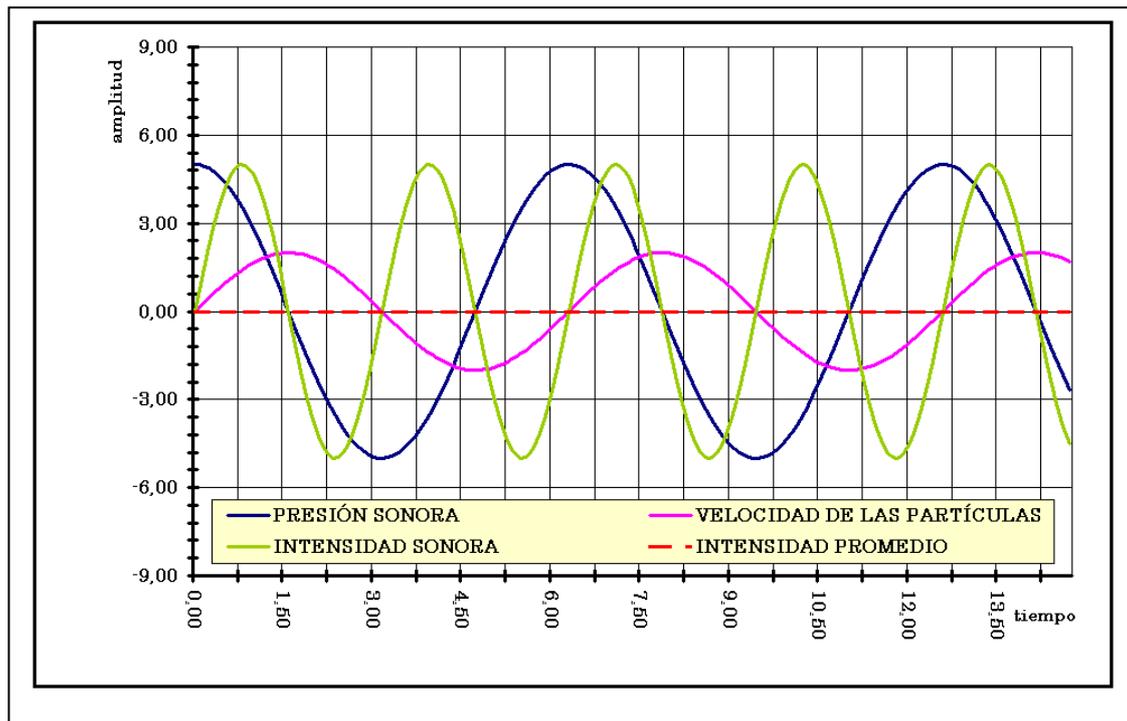


Figura 3.12.- La intensidad sonora promedio es cero cuando la presión sonora y la velocidad de las partículas del aire están desfasadas 90 grados, característica principal de un campo reactivo puro.

Un ejemplo de campo sonoro reactivo ideal es el que se genera en una sala muy reverberante, donde por definición no existe flujo neto de energía sonora. En un campo reverberante puro, la energía sonora que atraviesa la unidad de superficie en una dirección y sentido concreto, es conocida y se puede calcular utilizando la expresión (3.9).

$$I_x = \frac{p_{RMS}^2}{4\rho \cdot c} \quad (3.9)$$

Realmente, la expresión anterior representa la intensidad en una dirección x , ignorando la energía que fluye en sentido contrario. Este valor no puede ser medido con una sonda de intensidad, pero si a través de la presión sonora. Su principal aplicación es determinar la potencia sonora de máquinas en cámaras reverberantes.

3.5.- Teoría básica de la medida de la intensidad sonora

Cuando una partícula de aire se desplaza desde su posición media se produce un incremento temporal de la presión. El incremento de dicha presión produce un empuje que se transmite de la partícula más próxima a la siguiente partícula y, por

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

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

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

3.5.1.- Fundamentos de la sonda de intensidad del tipo p-p

Este método está basado en la segunda ley de Newton que es la ecuación fundamental de la dinámica, donde la fuerza resultante ejercida sobre un cuerpo de masa m , le transmite una aceleración inversamente proporcional a la masa de dicho cuerpo, $a=F/m$. La relación de Euler (3.10) está basada en la expresión anterior, pero aplicada a un fluido de densidad ρ . Según esta ecuación, es el gradiente de presión quien acelera al fluido en una determinada dirección \mathbf{r} . Conociendo el gradiente de presión y la densidad del fluido, puede calcularse la aceleración. Integrando la aceleración, obtenemos la velocidad de las partículas del medio [29].

$$-\text{grad}p = -\frac{\partial p}{\partial \mathbf{r}} = \rho \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \quad \Longrightarrow \quad \frac{\partial p}{\partial \mathbf{r}} = -\rho \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \quad (3.10)$$

Como el gradiente de presión es proporcional a la aceleración de las partículas, la velocidad de éstas se puede obtener integrando el gradiente de presión en la dirección r respecto del tiempo (3.11).

$$u_r = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt \quad (3.11)$$

En la práctica, el gradiente de presión puede ser aproximado mediante la medida de la presión en dos puntos, p_A y p_B , separados por un espaciador fijo. Si se divide la diferencia de presiones $p_A - p_B$, por la distancia que separa ambos micrófonos Δr , se obtiene una buena aproximación de la velocidad media de las partículas en la dirección r . La expresión (3.12) representa un estimador fiable que relaciona los parámetros mencionados anteriormente.

$$\hat{u}_r = -\frac{1}{\rho \cdot \Delta r} \int (p_B - p_A) dt \quad (3.12)$$

El símbolo $\hat{}$ representa en términos estadísticos el parámetro utilizado para estimar la medida, en este caso la velocidad media de las partículas del aire \hat{u}_r . Esta aproximación es válida cuando la distancia de separación de los micrófonos es pequeña en comparación con la longitud de onda del sonido en estudio, $\Delta r \ll \lambda$. La figura 3.13 muestra la longitud de onda de una señal sonora, relacionada con la propagación del campo sonoro y con la velocidad del sonido.

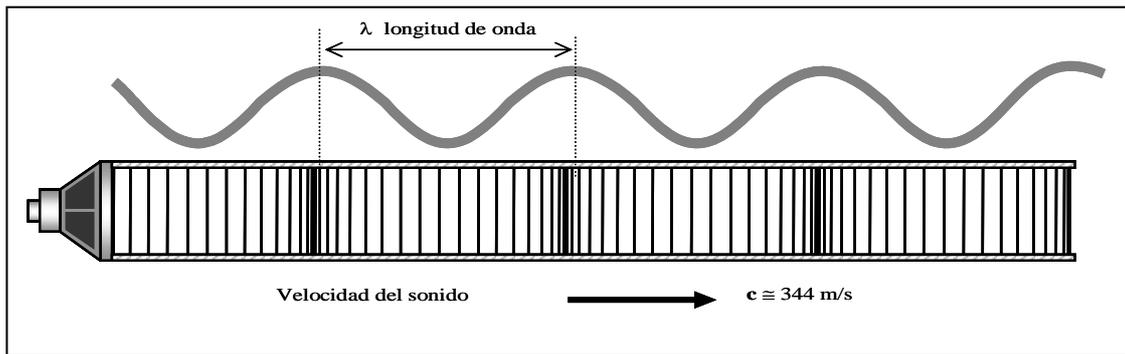


Figura 3.13. El producto de la longitud de onda λ multiplicada por la frecuencia f es una constante que se corresponde con la velocidad de propagación c de la onda sonora.

La longitud de onda λ de una señal sonora está relacionada con la velocidad de propagación del sonido c y su frecuencia f según la expresión (3.13). No se debe confundir la velocidad de propagación del sonido c con la velocidad de las partículas del aire \hat{u}_r .

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.13)$$

Desde el punto de vista práctico, la sonda de intensidad sonora está formada por dos micrófonos separados por un espaciador. Midiendo ambas presiones, se obtiene el gradiente de presión a lo largo de la línea imaginaria que une el centro de ambos micrófonos; así mismo, la estimación de la velocidad de las partículas del aire se realiza en la posición central de esta línea, es decir, en el punto equidistante entre los micrófonos, figura 3.14.

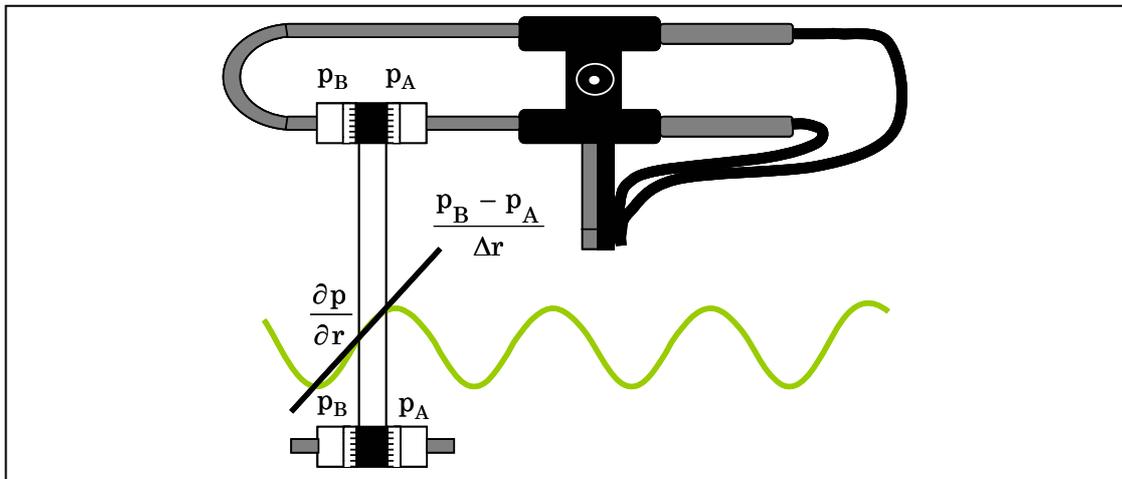


Figura 3.14. - Determinación del gradiente de presiones con una sonda de intensidad del tipo p-p

El gradiente de presión es una función continua que varía suavemente. Con los dos micrófonos, separados ligeramente, es posible obtener una línea tangente como aproximación al gradiente de presión. Determinando la diferencia de presiones y dividiendo por la distancia de separación de los transductores se obtiene la pendiente de dicha tangente por diferencias finitas.

Teniendo en cuenta la expresión (3.12), la integración del gradiente de presión permitirá obtener la velocidad de las partículas del medio de transmisión y a continuación la intensidad sonora. En la práctica, se utiliza un integrador temporal ideal cuya función de transferencia es, $H(\omega)=1/j\omega$. La forma de utilizar este operador con una onda genérica es la siguiente:

$$p(x,t) = p_0 \cdot e^{j(\omega \cdot t - k \cdot x)}$$

$$\int p(x,t) \cdot dt = p_0 \cdot e^{-jk \cdot x} \cdot \int e^{j\omega \cdot t} \cdot dt = p_0 \cdot e^{-jk \cdot x} \frac{1}{j\omega} e^{j\omega \cdot t} = \frac{1}{j\omega} p(x,t)$$

La integral de la señal de entrada en el dominio del tiempo puede hallarse simplemente multiplicando por $1/j\omega$. En sentido estricto, este procedimiento es matemáticamente incorrecto, pero se obtienen resultados aceptables por encima de demostraciones exactas. En la figura 3.15 se muestra la respuesta de un integrador ideal en amplitud y fase.

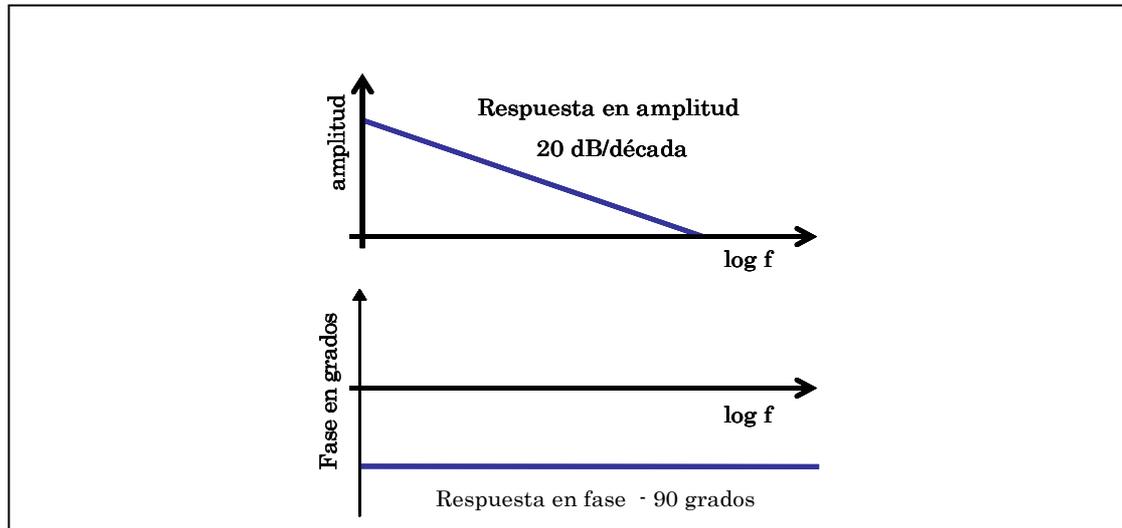


Figura 3.15. - Función de transferencia de un integrador ideal.

Por lo tanto, la respuesta en amplitud al aplicar dicho integrador decae en 20 dB/década y la respuesta en fase está 90° retrasada. En adelante, se utilizará este operador de integración para obtener el algoritmo matemático que permita medir la intensidad sonora.

Para determinar la intensidad sonora es necesario realizar el producto entre la señal de la presión y la velocidad de las partículas del aire obtenida por integración del gradiente de presión. Dependiendo del orden en que se tomen los micrófonos con respecto a la dirección de propagación de la onda sonora, la intensidad puede ser positiva o negativa.

En la figura 3.16 se muestra de forma gráfica, la composición de las distintas señales para calcular la intensidad sonora cuando ésta es positiva. Se aporta el procedimiento de tratamiento paso a paso de las señales de los micrófonos. Si el sentido de propagación de la onda sonora es contrario al sentido positivo convenido para la sonda, la intensidad sonora resultante será negativa, ya que las señales de presión y de velocidad estarán en contrafase, como se aprecia en la figura 3.17.

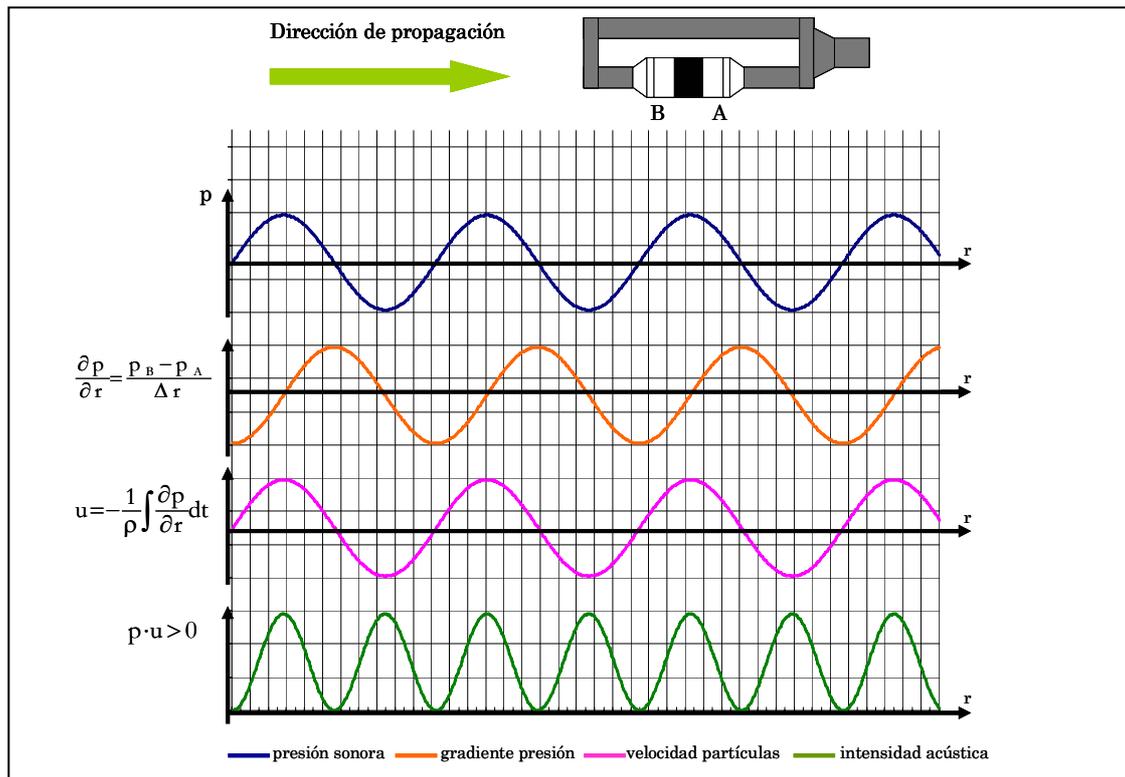


Figura 3.16.- Determinación paso a paso de la intensidad sonora con dirección de propagación positiva.

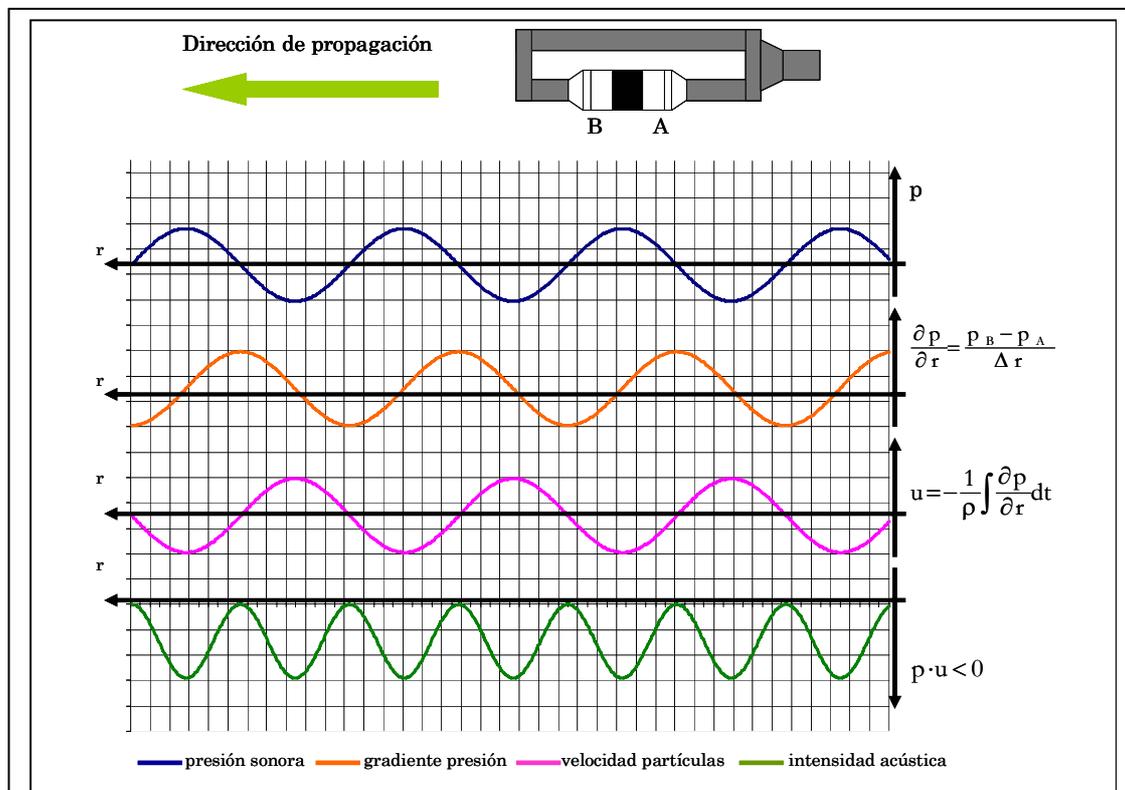


Figura 3.17.- Determinación de la intensidad sonora con dirección de propagación negativa.

Además, la variación de la fase de la señal de presión sonora esta relacionada con la componente real del vector intensidad, que tiene su origen en el flujo neto de energía. Esto se puede demostrar calculando la inversa de la impedancia específica del medio ($Z_s = \rho \cdot c$). Para ello, se utiliza la analogía de la ley de Ohm aplicada a la acústica, que se define como la relación entre la velocidad de las partículas (*corriente acústica*) y la presión (*tensión acústica*).

$$Z_s = \frac{p}{u_r} \quad (3.14)$$

Cuanto mayor sea la variación de la presión sonora medida simultáneamente por ambos micrófonos, mayor será la energía que fluye en esa dirección. Tomado en consideración la expresión (3.14), se puede obtener la componente real e imaginaria de la inversa de la impedancia acústica Z_s , determinándose de esta forma las variables de las que depende la propagación de la energía acústica.

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{u_r}{p}$$

Sustituyendo la velocidad de las partículas del aire según la ecuación (3.11), que depende del gradiente de presiones y de la densidad del fluido donde se propaga la onda sonora, la “ley de Ohm acústica” queda como sigue,

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}}{p}$$

$$\frac{1}{Z_s} = -\frac{1}{j\omega \cdot \rho} \cdot \frac{\partial p}{p \cdot \partial r} = -\frac{1}{j\omega \cdot \rho} \cdot \frac{\partial \ln(p)}{\partial r} \quad (3.15)$$

Representando la variación de la presión sonora en un punto del espacio y teniendo en cuenta que la distancia entre micrófonos es despreciable, la ecuación de la onda se simplifica y puede deducirse que,

$$p = p_0 \cdot e^{j\omega t} = p_0 \cdot e^{j\phi}$$

Sustituyendo la expresión anterior en (3.15),

$$\frac{1}{Z_s} = -\frac{1}{j\omega \rho} \left[\frac{\partial \ln [p_0 e^{j\phi}]}{\partial r} \right] = -\frac{1}{j\omega \rho} \left[\frac{\partial [\ln(p_0) + j\phi]}{\partial r} \right]$$

Tomando un valor arbitrario p_A para hacer el argumento de la función logarítmica de dimensión mayor, y sustituyendo queda,

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{1}{\rho \cdot \omega} \left[-\frac{1}{j} \cdot \frac{\partial \ln \left[\frac{p_o}{p_A} \right]}{\partial r} - \frac{\partial \phi}{\partial r} \right]$$

Eliminando el denominador complejo multiplicando y dividiendo por j , la ecuación se expresa finalmente de la siguiente forma,

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{1}{\rho \omega} \cdot \left[j \cdot \frac{\partial \ln \left[\frac{p_o}{p_a} \right]}{\partial r} - \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] \quad (3.16)$$

En la expresión (3.16) se aprecia que el campo sonoro puede tener una componente real y otra imaginaria. Cuando solo posee componente real el campo sonoro se considera libre. Por el contrario, cuando solo posee componente imaginaria el campo sonoro se dice que es reactivo puro. La mayoría de los campos sonoros generados por una fuente poseen una componente activa coincidente con la parte real, y otra reactiva coincidente con la parte imaginaria.

De la expresión (3.16) también se deduce que para que existan condiciones de campo libre, se tiene que manifestar una diferencia de fase entre las medidas de presión sonora de los dos micrófonos, que han sido situados a una distancia prefijada en el espacio y tomadas de forma simultánea. En este caso la presión sonora y la velocidad de las partículas estarán en fase. Si por el contrario, solo se tiene variación del módulo de la presión sonora pero no de su fase, la velocidad de las partículas y la propia presión sonora estarán 90° desfasadas, no existiendo condiciones de campo libre.

Si se considera las condiciones de un campo libre y se tiene en cuenta solamente la parte real de la expresión (3.16), la intensidad sonora puede medirse considerando lo siguiente:

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{1}{\rho \cdot \omega} \left[-\frac{\partial \phi}{\partial r} \right] = -\frac{1}{\rho \cdot \omega} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r}$$

Como la inversa de la impedancia acústica está relacionada con la presión sonora y la velocidad de las partículas de aire, tenemos que,

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{u_r}{p} \quad u_r = \frac{p}{Z_s} = p \cdot \left[-\frac{1}{\rho \cdot \omega} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] = -\frac{1}{\rho \cdot \omega} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \cdot p$$

Sustituyendo en (3.5),

$$I_r = p \cdot u_r = p \cdot \left[-\frac{1}{\rho \cdot \omega} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \cdot p \right] = -\frac{1}{\rho \cdot \omega} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \cdot p^2 \quad (3.17)$$

Teniendo en cuenta que,

$$\begin{aligned} \omega &= 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{T} & c &= \frac{\lambda}{T} & \omega &= 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{T} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{c}{\lambda} \\ \omega &= 2 \cdot \pi \cdot \frac{c}{\lambda} & c &= \frac{\omega \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} & k &= \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \end{aligned}$$

Sustituyendo en (3.17),

$$I_r = -\frac{1}{\rho \cdot \omega} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \cdot p^2 = -\frac{1}{\rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{c}{\lambda}} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \cdot p^2 = -\frac{p^2}{\rho \cdot c \cdot k} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r}$$

Como la variación de la fase entre dos puntos separados una distancia prefijada Δr respecto de r es constante, y su valor coincide con el número de onda k ; la expresión que se obtiene es la que permite estimar la intensidad sonora en condiciones de campo libre.

$$\bar{I}_r = -\frac{1}{\rho \cdot k \cdot c} \cdot k \cdot p^2 = -\frac{p^2}{\rho \cdot c}$$

Utilizando la analogía de la ley de Ohm aplicada a la acústica, para que exista corriente eléctrica, es decir, flujo neto de energía en el circuito eléctrico, es necesario que se dé una diferencia de potencial entre dos puntos. De la misma forma, para que exista flujo neto de energía acústica, es necesario que se dé una variación de la fase de la presión sonora en el espacio. El signo negativo indica la dirección en que se propaga la energía respecto del criterio de signos adoptado. De esta deducción se concluye que para determinar la intensidad sonora (3.17), además de medir la presión, hay que obtener la diferencia de fases entre las dos señales de presión de los micrófonos separados una distancia Δr .

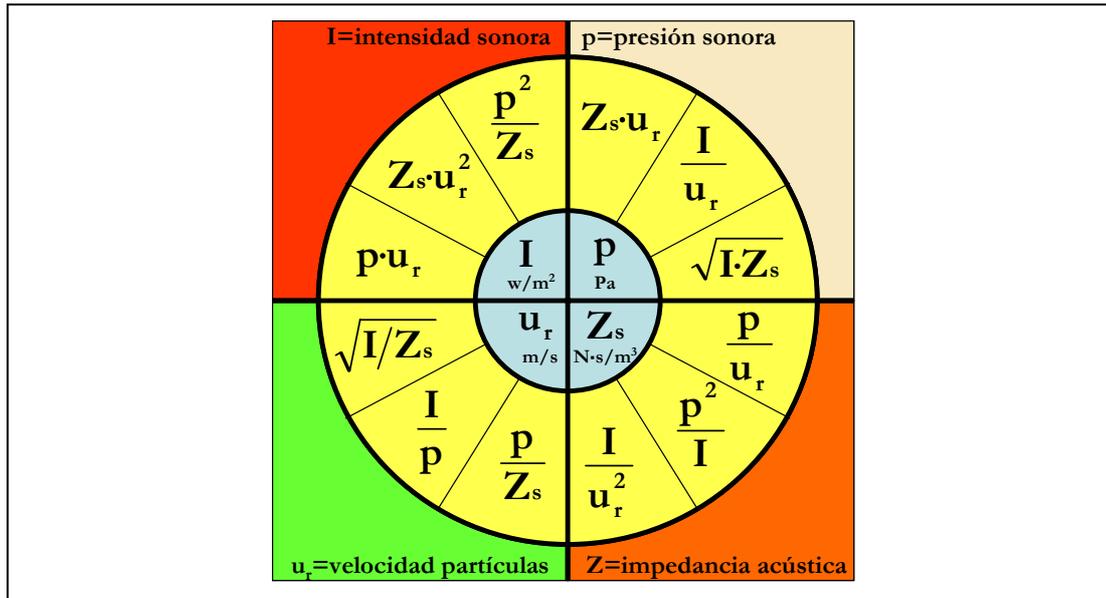


Figura 3.18.- Relación entre los parámetros acústicos.

Finalmente, la figura 3.18 muestra de forma resumida, la relación de todas las variables por analogía con la Ley de Ohm.

3.5.2.- Procesado de señal con una sonda de intensidad del tipo p-p

Un sistema analizador de intensidad sonora del tipo p-p consta de una sonda y un analizador. La sonda mide simultáneamente la presión sonora con dos micrófonos. El analizador realiza la integración y los cálculos necesarios para obtener la intensidad sonora. Estas ecuaciones no son nuevas. Lo que es nuevo es el uso de las modernas técnicas de procesado de señal para obtener la intensidad sonora. Ésta puede obtenerse de dos formas: mediante uso directo de integradores y filtros analógicos o digitales, para llevar a cabo la resolución de la ecuación, o mediante el uso de un analizador FFT. Este último relaciona la intensidad con la parte imaginaria del espectro cruzado de las dos señales de los micrófonos. Las dos formas son equivalentes y con ambas se obtiene la intensidad sonora con aceptable fiabilidad.

Método directo

Los equipos que utilizan el método directo suelen ser portátiles, procesando la señal por medio de hardware específico que realiza los cálculos necesarios siguiendo la ecuación (3.18). La componente del vector de la intensidad sonora en la dirección r se calcula por medio de dicha expresión.

$$\hat{I}_r = \overline{p \cdot u_r} = -\frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \Delta r} \cdot \overline{(p_A + p_B) \int (p_B - p_A) \cdot dt} \quad (3.18)$$

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

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

En la figura 3.19 se muestra un diagrama de bloques de un medidor de intensidad sonora en tiempo real, incluido el filtrado digital en tercios de octava. Se puede observar que el diagrama de bloques sigue la ecuación paso a paso. En primer lugar la señal es captada por los micrófonos, preamplificada y filtrada. En segundo lugar se obtiene la presión media medida para ambos micrófonos por una parte y, por la otra, el gradiente de presión definido para ambas señales en el espacio. Finalmente, el producto de los valores obtenidos entre sí y su promediado posterior, determina el valor de la intensidad sonora [29]. El método directo es muy útil para el desarrollo de equipos portátiles de medida.

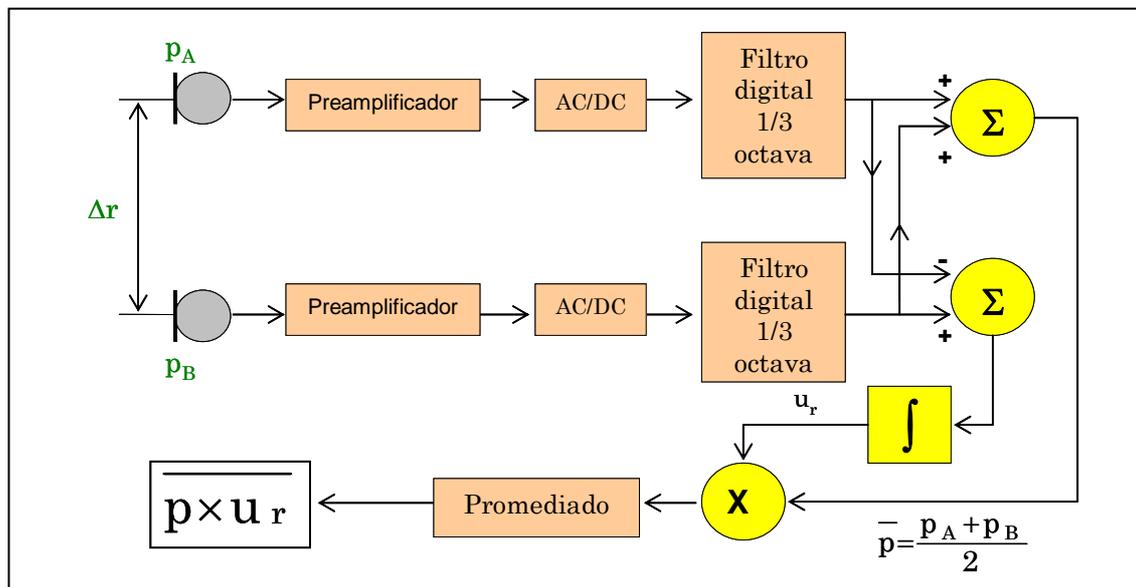


Figura 3.19.- Esquema de bloque de un analizador que utiliza el método directo.

Método indirecto

Un analizador de dos canales FFT (Fast Fourier Transform) se puede utilizar para el cálculo de la intensidad sonora teniendo en cuenta las particularidades de la

FFT. La intensidad puede ser calculada determinando la parte imaginaria del espectro cruzado de las dos señales de los micrófonos.

$$\hat{I}_r = -\frac{2 \cdot \text{Im} S_{AB}}{\omega \cdot \rho \cdot \Delta r} \quad (3.19)$$

Para demostrar la expresión anterior se parte de dos señales estacionarias, que pueden ser consideradas así cuando se supone que ha transcurrido una cantidad de tiempo lo suficientemente grande. En este caso se tiene que la intensidad sonora en la dirección \mathbf{r} es igual a,

$$I_r = \overline{p(\mathbf{r}, t) \cdot u(\mathbf{r}, t)}$$

La intensidad I_r puede ser expresada como la función de correlación cruzada, R_{pu} entre $p(\mathbf{r}, t)$ y $u(\mathbf{r}, t)$. Para un τ arbitrario:

$$R_{pu}(\mathbf{r}, \tau) = \overline{p(\mathbf{r}, t) \cdot u(\mathbf{r}, t + \tau)}$$

Sea, $S_{pu}(\mathbf{r}, f)$ la función del espectro cruzado asociada con la función de correlación cruzada $R_{pu}(\mathbf{r}, \tau)$. Puede demostrarse que la parte real del espectro cruzado $\text{Re}\{S_{pu}(\mathbf{r}, f)\}$ es una función par, mientras que la parte imaginaria $\text{Im}\{S_{pu}(\mathbf{r}, f)\}$ es impar, cuando $R_{pu}(\mathbf{r}, \tau)$ es una función real. Utilizando la transformada inversa de Fourier se relaciona la función de correlación cruzada con su respectiva función del espectro cruzado.

$$R_{pu}(\mathbf{r}, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{pu}(\mathbf{r}, f) \cdot e^{j\omega\tau} \cdot df$$

Además, para $\tau=0$,

$$I_r = R_{pu}(\mathbf{r}, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{pu}(\mathbf{r}, f) \cdot df$$

Por lo que la intensidad puede ser calculada desde la parte real de la función del espectro cruzado $S_{pu}(\mathbf{r}, f)$. Sean, $P(f)$ y $U(f)$, las transformadas de Fourier de $p(t)$ y $u(t)$, que por definición se expresan como:

$$P(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t) \cdot e^{-j\omega \cdot t} \cdot dt \quad U(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) \cdot e^{-j\omega \cdot t} \cdot dt$$

Recordando las expresiones que definían la medida de los parámetros en la dirección \mathbf{r} , se tiene que,

$$\begin{aligned} P(f) &= \frac{1}{2} \{P_A(f) + P_B(f)\} \\ U(f) &= -\frac{1}{j\omega \cdot \rho \cdot \Delta r} \{P_B(f) - P_A(f)\} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Por definición, el espectro cruzado entre la señal de presión y la señal de la velocidad de las partículas es:

$$S_{pu} = E[P^*(f) \cdot U(f)]$$

Recuérdese, que el producto cruzado de dos espectros se puede transformar de la siguiente manera,

$$S_{pu}^* = E[(P^* \cdot U)^*] = E[(P \cdot U^*)] = E[(U^* \cdot P)] = S_{up} \quad (3.21)$$

Que nos indica como debe realizarse el espectro cruzado en la práctica, es decir,

$$S_{up} = E[U^*(f) \cdot P(f)]$$

Para el cálculo de intensidad solo nos interesa la parte real de la función del espectro cruzado. Sustituyendo las expresiones (3.20) de la velocidad de las partículas y de la presión sonora en la ecuación anterior. Multiplicando y dividiendo por j y eliminando el término $\frac{1}{2}$ al promediar las señales, tenemos que,

$$\begin{aligned} S_{up} &= E[U^*(f) \cdot P(f)] = \frac{1}{j\omega \cdot \rho \cdot \Delta r} E[(P_B^*(f) - P_A^*(f)) \cdot (P_A(f) + P_B(f))] \\ S_{up} &= \frac{-1}{\omega \cdot \rho \cdot \Delta r} E[j(S_{BB} - S_{AA}) - j(S_{AB} - S_{BA})] \end{aligned}$$

Haciendo uso de la propiedad definida anteriormente (3.21), que permite sustituir un espectro cruzado por su conjugado, tenemos que,

$$j(S_{AB} - S_{BA}) = j(S_{AB} - S_{AB}^*) = j(2 \cdot j \cdot \text{Im} S_{AB}) = -2 \cdot \text{Im} S_{AB}$$

Por lo tanto, la ecuación del espectro cruzado puede ser escrita como:

$$S_{up} = \frac{-1}{\omega \cdot \rho \cdot \Delta r} E[(S_{BB} - S_{AA})j + 2 \cdot \text{Im} S_{AB}]$$

Tomando la parte real de la expresión para la determinación de $I(\mathbf{r}, f)$, y considerando tan solo las frecuencias “positivas” del espectro cruzado, la intensidad sonora se obtiene con la siguiente ecuación,

$$\hat{I}(\mathbf{r}, f) = -\frac{2 \cdot \text{Im} S_{AB}}{\omega \cdot \rho \cdot \Delta r} = -\frac{\text{Im} G_{AB}}{\omega \cdot \rho \cdot \Delta r}$$

El término G_{AB} representa el espectro cruzado por una cara que es el que se corresponde con las frecuencias positivas. Debe tenerse en cuenta que, $(2S_{AB} = G_{AB})$. Finalmente, la estimación adecuada de la intensidad teniendo en cuenta todas las frecuencias comprendidas en el ancho de banda del espectro es,

$$\hat{I}_r = -\int_0^{+\infty} \frac{\text{Im} G_{AB}}{\omega \cdot \rho \cdot \Delta r} df$$

O bien, discretizando:

$$\hat{I}_r = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \Delta r} \sum_{n=1}^{N/2} \frac{\text{Im} G_{AB}(n\Delta f)}{n \cdot \Delta f}$$

Donde el sumatorio se inicia en la baja frecuencia $\Delta f = 1/T$, y tiene su límite superior en la frecuencia de corte de Nyquist $(N/2) \cdot \Delta f$. Este algoritmo matemático es el método más utilizado en la actualidad para la determinación de la intensidad sonora. Es necesario un ordenador para la realización de los cálculos finales. El método tiene alguna desventaja, ya que las medidas de sonido son especificadas normalmente en octavas o tercios de octava y el cálculo de éstas a través de los espectros de banda estrecha es un procedimiento que consume tiempo de procesado. Normalmente requiere análisis multipaso y síntesis, no considerándose el procesado en tiempo real estrictamente hablando.

Como aplicación, utilizando el procesado de señal, se puede también determinar la impedancia específica del medio. Para ello, obtenemos el espectro cruzado de las señales de presión sonora y velocidad de las partículas, y el autoespectro de la velocidad de las partículas. Su cociente es la impedancia específica (3.22).

$$Z_s = \frac{P(f)}{U(f)} = \frac{G_{pu}}{G_{uu}} \quad (3.22)$$

El análisis multicanal utilizando la FFT es una herramienta muy potente en la medida y análisis de los campos sonoros. Además de la componente activa de la intensidad sonora también se puede medir la componente reactiva.

3.5.3.- Direccionalidad de la sonda de intensidad del tipo p-p

Todas las sondas de intensidad existentes en el mercado, independientemente del tipo que sean, poseen características direccionales que se deben conocer bien para no cometer errores de medida. En la figura 3.20 se muestra las características direccionales de la sonda de intensidad sonora del tipo p-p. Apréciase que la sonda es muy sensible en la dirección r en la que se orienta. Siendo nula la medida de la intensidad sonora cuando la fuente está situada perpendicularmente a la recta virtual que une ambos micrófonos.

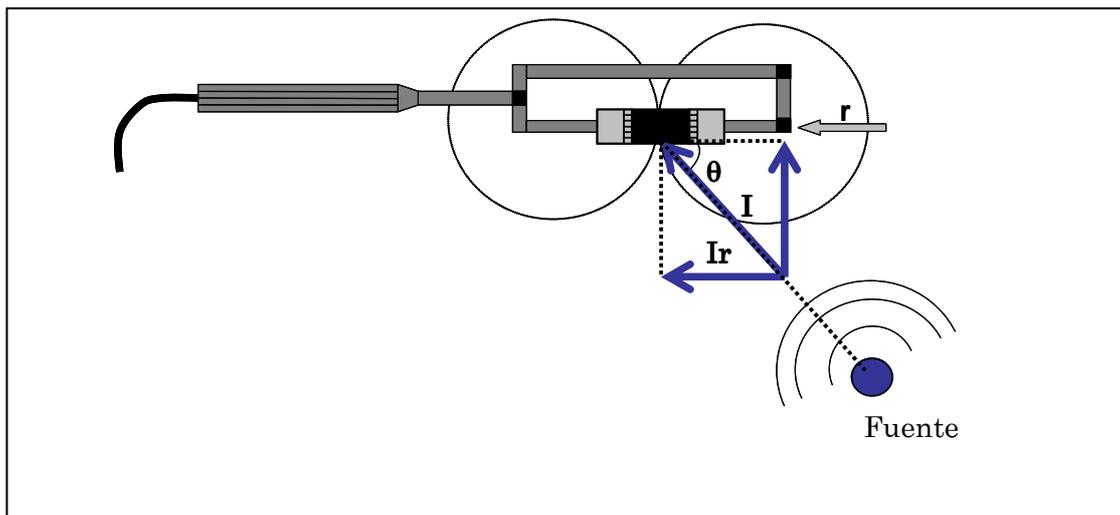


Figura 3.20.- Características direccionales de la sonda de intensidad. El vector medido por la sonda es el representado por I_r , que se corresponde con la componente activa de la intensidad sonora.

Si la sonda de intensidad no se orienta en la dirección de la fuente, la intensidad medida por ésta es la resultante de proyectar el vector que define la intensidad sobre la recta de dirección r . Luego, la intensidad obtenida en la medida respecto de la intensidad emitida por la fuente, se relacionan según la expresión,

$$|I_r| = |I| \cdot \cos(\theta) \quad (3.23)$$

Donde θ es el ángulo definido entre la dirección en la que se orienta la sonda y la dirección del flujo de energía, es decir, la recta que une la sonda con la fuente.

3.5.4.- Fundamentos de la sonda de intensidad del tipo p-u

Como alternativa a la medida de intensidad sonora utilizando una sonda de intensidad del tipo p-p, se encuentra una tecnología reciente que está empezando a penetrar en el mercado, que es la sonda de intensidad del tipo p-u.

Este tipo de sonda de intensidad se basa en el principio empleado por los anemómetros clásicos de hilo caliente. Para medir directamente la velocidad del aire se utilizan dos hilos ultrafinos de platino que se calientan por el paso de la corriente eléctrica, entre 200 y 300 °C, figura 3.21. Este tipo de transductor fue inventado en la Universidad de Twente (Holanda) en 1994 y recibe el nombre comercial de Microflown [12]. En el año 2000 se definieron los modelos matemáticos y en el 2004 se consiguió la calibración de la sonda.

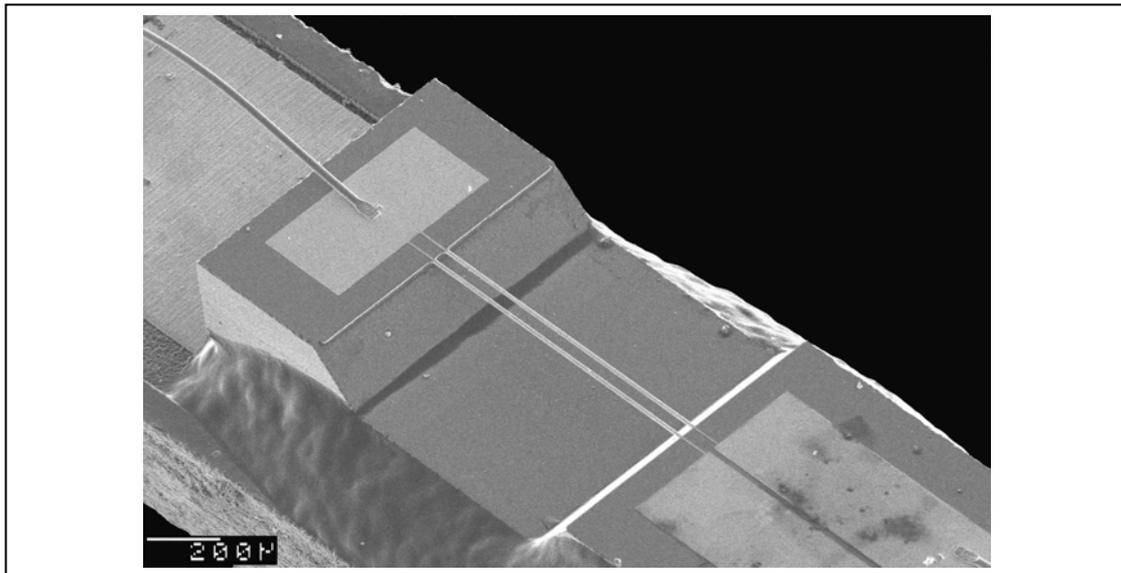


Figura 3.21.- Detalle de la colocación de los hilos ultrafinos de platino de una sonda del tipo p-u.

Habría que aclarar que un anemómetro clásico solo necesita de un hilo ultrafino para medir la velocidad de las partículas del aire. Se utilizan dos hilos situados de forma paralela para poder definir la dirección de propagación de la energía del campo sonoro. Además del sensor de velocidad de las partículas de aire, la sonda se completa con la señal de un micrófono. El principio de funcionamiento es muy simple. Se basa en que el flujo de aire generado en la propagación de un campo

sonoro en dirección perpendicular al hilo, cambia la distribución de temperaturas de éste de forma instantánea, ya que el hilo delantero es enfriado más que el trasero por la acción del flujo de aire. Entiéndase por hilo delantero el que primero recibe la onda sonora.

El resultado de la diferencia de resistencias entre los hilos proporciona una respuesta lineal en el ancho de banda de 0 a 20 kHz. No obstante, el comportamiento de este transductor es diferente en función de la frecuencia. A bajas frecuencias la sensibilidad a la velocidad de las partículas del aire se incrementa 6 dB por octava. Entre 100 Hz y 1 kHz, la respuesta en frecuencias es prácticamente plana. De 1 kHz a 10 kHz, la respuesta oscila 6 dB por octava, debido al efecto de la difusión relacionada con la distancia entre los dos hilos de platino. Por último, a partir de los 10 kHz la sensibilidad decrece adicionalmente 6 dB por octava.

Sensibilidad del sensor

Se puede representar gráficamente el efecto de enfriamiento originado por el flujo de aire en movimiento en el entorno del hilo de platino. En la figura 3.22 se muestra como se distribuye la temperatura alrededor del mencionado hilo cuando existe flujo de aire y también cuando el flujo es nulo.

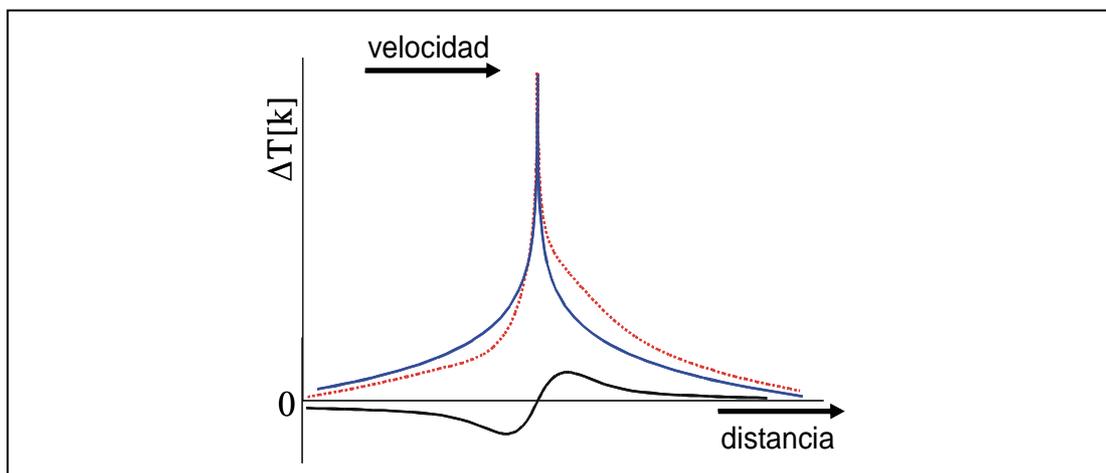


Figura 3.22. - Diferencia del gradiente de temperaturas en la zona próxima al hilo de platino.

Se ha representado en color azul el gradiente térmico en función de la distancia cuando no existe señal sonora, es decir, sin flujo neto de energía. Por otra parte, en rojo se ha representado la perturbación originada por el movimiento del aire cuando existe campo sonoro con flujo neto de energía sonora. La distribución de

temperaturas se ve modificada por un enfriamiento en el entorno próximo del hilo de platino en la parte que recibe la onda sonora directamente. Sin embargo, debido al efecto de convección, la temperatura se incrementa una vez rebasado el hilo de platino. En negro se representa la diferencia entre ambas curvas. El rango de velocidades del aire capaz de detectar el sensor oscila entre 10 nm/s y 1m/s.

Si se dispone de dos hilos, debido a la transferencia de calor por convección, el hilo de platino que recibe la onda sonora en primer lugar está menos caliente que el otro hilo. Teniendo en cuenta este detalle, el sistema permite distinguir el sentido de propagación de la onda sonora de acuerdo con la posición positiva de la sonda. Resulta evidente, que la distancia de separación de los hilos de platino, va a ser un factor de diseño importante. Si la distancia es grande, la transferencia de calor por convección de un hilo a otro se considerará despreciable, de la misma forma que lo es la transferencia de calor por radiación. Si los hilos están muy próximos, puede no existir diferencia de temperatura entre ellos y no se podrá determinar el sentido del flujo neto de la energía sonora.

Cuando la distancia de separación es la adecuada, se obtiene una respuesta del gradiente térmico de los dos hilos de forma conjunta similar al de la figura 3.23, donde cada hilo detecta un valor de temperatura diferente.

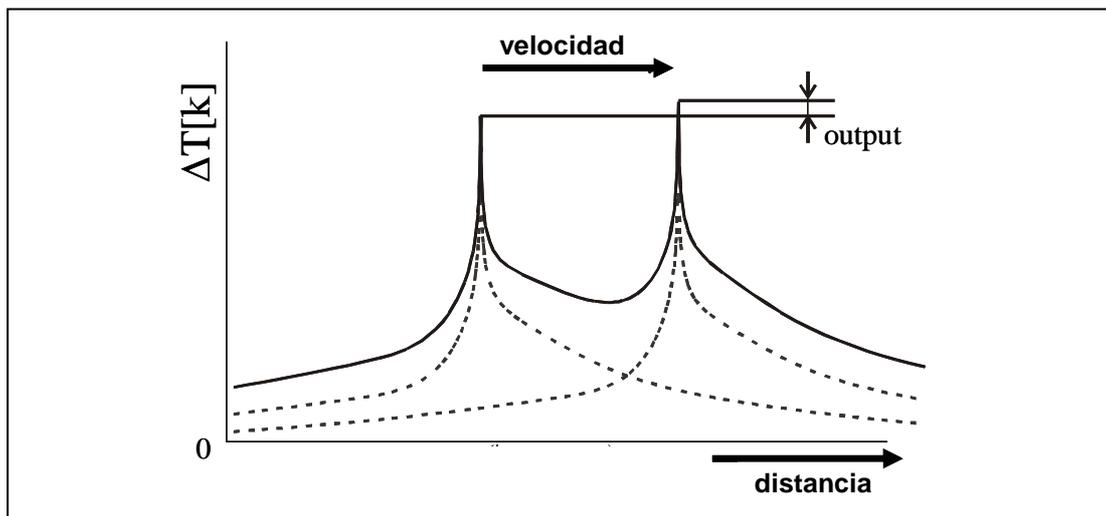


Figura 3.23.- Diferencia de temperatura entre los dos hilos de platino.

La variación de la temperatura de los dos hilos de platino debido a una onda sonora de gran amplitud, como se muestra en la figura 3.23, permite determinar la diferencia entre ambas señales de temperatura. La suma de ambas aporta la parte

común. Por otra parte, debido a la velocidad de las partículas ambos hilos de platino se enfrían pero de manera diferente, la diferencia de temperaturas es proporcional a la velocidad de las partículas.

En la figura 3.24, se muestra el procedimiento empleado para obtener la diferencia de temperaturas. Ésta se obtiene tomando el criterio arbitrario de restar a la temperatura del hilo 2 la temperatura del hilo 1, quedando definido pues, el sentido positivo de la sonda.

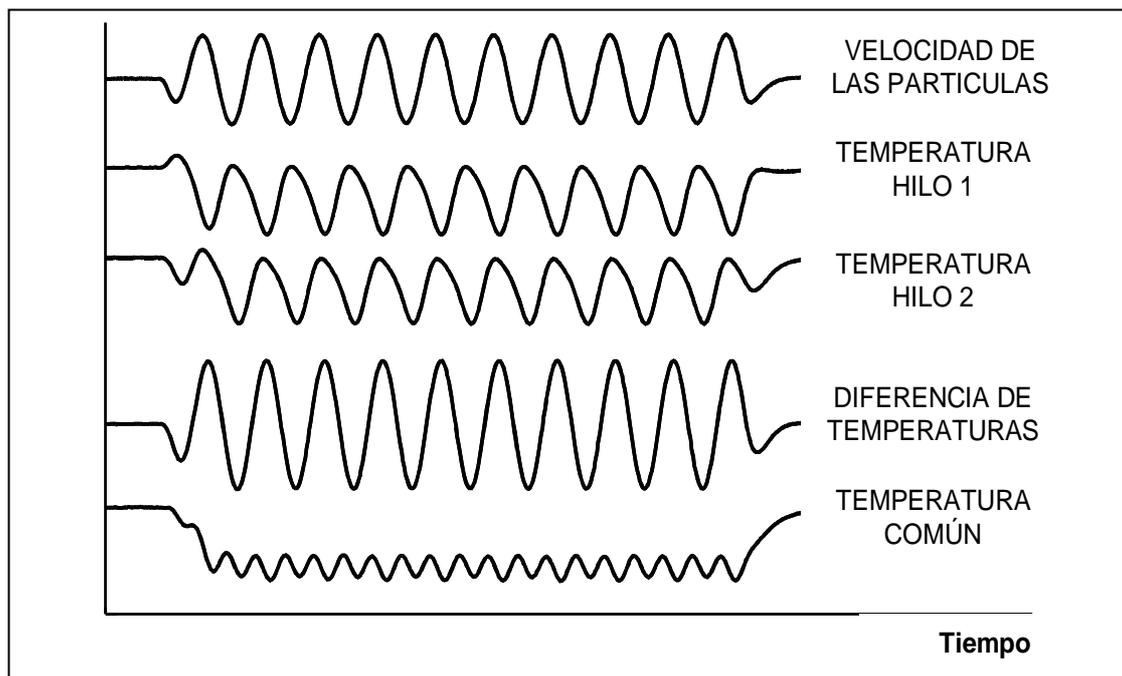


Figura 3.24. - Medida de temperaturas de los hilos de platino afectados por una onda sonora.

3.5.5.- Procesado de señal con una sonda de intensidad del tipo p-u

La respuesta en frecuencia de este tipo de transductor no es plana, salvo en el tramo de 100 Hz a 1kHz. Es necesario acondicionar la señal para cada tramo de frecuencia. Las frecuencias más bajas entre 100 Hz-1kHz, las frecuencias medias entre 1kHz-10 kHz y frecuencias mayores a 10 kHz. Para ello, se utilizan filtros paso-banda para discriminar las frecuencias que han de ser corregidas. Una vez filtradas las señales con los filtros paso-banda se corrige la medida teniendo en cuenta el incremento positivo o negativo en dB, según lo especificado para cada rango de frecuencia. El inconveniente más importante de estos transductores es el tiempo que se necesita para ajustar la sonda para todo el ancho de banda objeto de estudio. El esquema de bloques funcional de este tipo de sonda está constituido por

un canal específico para el transductor de velocidad y otro canal para el micrófono. El procesamiento de señal es muy diferente para cada uno de los dos canales, mientras que la señal del micrófono tiene un tratamiento sencillo, la del transductor de velocidad resulta bastante compleja debido a los filtros paso-banda para cada intervalo de frecuencia, figura 3.25.

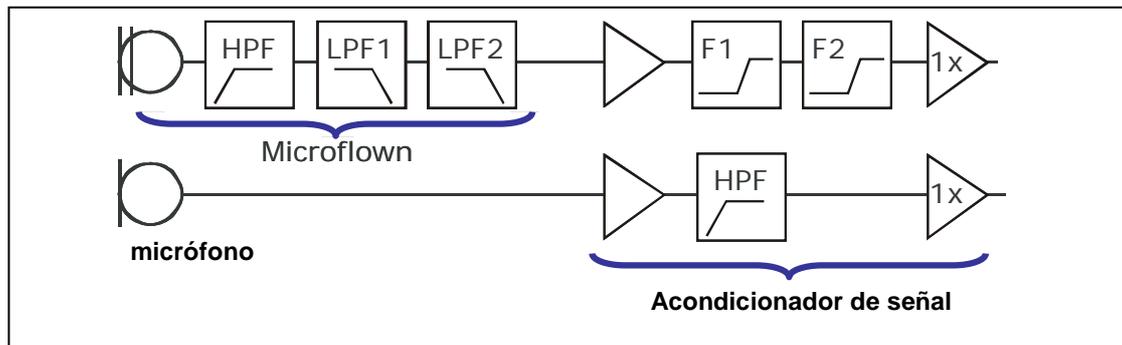


Figura 3.25. - Esquema del acondicionamiento de la señal para una sonda del tipo p-u.

En la figura 3.26 se muestra una sonda de intensidad sonora compuesta por un sensor para medir la velocidad de las partículas y un micrófono para medir la presión sonora. El producto de ambas señales permite calcular la intensidad sonora.

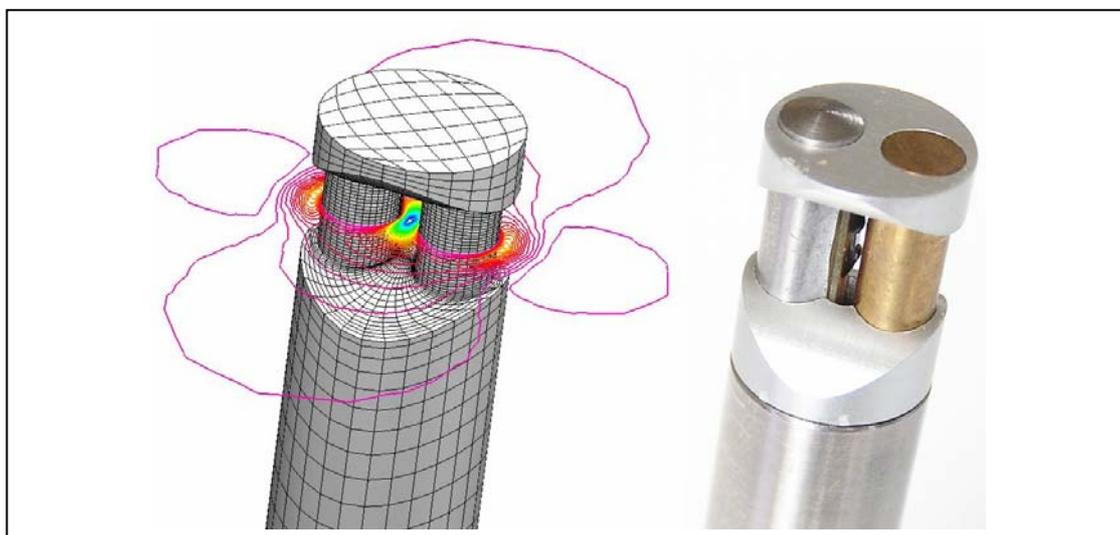


Figura 3.26. - Detalle constructivo de una sonda de intensidad sonora del tipo p-u.

Esta tipo de sonda, al igual que sucede con la sonda del tipo p-p, tiene características direccionales que dependen del ángulo definido por la dirección de la orientación de la sonda y la recta que la une con la fuente sonora. La correcta orientación de la sonda implica que la onda sonora debe incidir perpendicularmente

a los hilos del transductor que miden la velocidad de las partículas del aire. En la figura 3.27 se muestra, para distintas frecuencias, el comportamiento direccional de la sonda del tipo p-u.

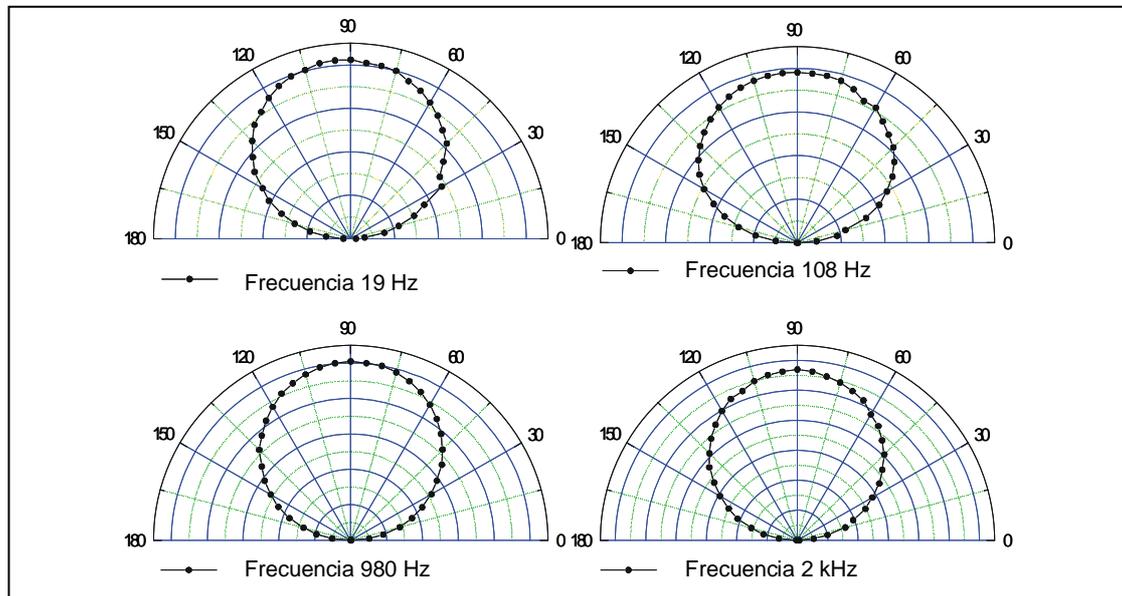


Figura 3.27.- Diagramas polares de la sensibilidad de la sonda a distintas frecuencias y en función de la dirección de propagación de la onda sonora.

La realización de medidas con una sonda del tipo p-u aporta algunas ventajas respecto de las medidas realizadas con una sonda del tipo p-p. No obstante, la falta de procedimientos normalizados y su difícil calibración, limitan su uso en la actualidad. Para poder comparar las medidas de intensidad sonora en cualquier parte del mundo es conveniente utilizar una sonda del tipo p-p.

3.5.6.- Índice de reactividad. Valoración del campo reactivo

En el campo libre los niveles de presión e intensidad en la dirección de propagación son aproximadamente iguales. Por ello, cuando se dan las condiciones de campo libre, las medidas de intensidad no son necesarias, se puede medir presión sonora. Como en la mayoría de las ocasiones no se está en condiciones de campo libre, existirá diferencia entre los niveles de presión sonora y de intensidad sonora al realizar las medidas. La diferencia existente entre ambos niveles (3.24) está relacionada con el grado de reactividad del campo sonoro y se conoce como índice de reactividad o índice presión-intensidad.

$$L_K = L_I - L_p \tag{3.24}$$

Este índice, ampliamente comentado en el siguiente capítulo, es de gran utilidad para determinar el grado de precisión de aquellas medidas realizadas en el campo próximo de una fuente sonora o en campos difusos donde la intensidad tenga un nivel menor que el nivel de presión.

Capítulo 4

VALIDACIÓN Y PRECISIÓN DEL MÉTODO DE BARRIDO PARA LA MEDIDA DE LA INTENSIDAD SONORA

4.1.- Introducción

Recuérdese que la intensidad sonora es un vector que describe la magnitud y la dirección del flujo neto de energía acústica en una posición dada. En el capítulo 3 se demostró que la intensidad sonora no solo depende de que exista variación de presión sonora en un campo sonoro. Se debe cumplir además, que en la dirección \mathbf{r} exista variación de la fase de la señal de presión sonora en el campo donde existe propagación neta de energía.

$$I_{\mathbf{r}} = -\frac{p_{\text{RMS}}^2}{\rho \cdot c} \cdot \frac{1}{k} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \quad (4.1)$$

Donde,

$\frac{\partial \Phi}{\partial r}$, es el gradiente de fase del campo sonoro medido en la dirección \mathbf{r}

p_{RMS}^2 , es la presión eficaz al cuadrado

$\rho \cdot c$, representa la impedancia del medio

k , es el número de onda

La ecuación (4.1) muestra que el cálculo de la intensidad utilizando el método de los dos micrófonos, necesita de la determinación de la presión sonora efectiva al cuadrado y de la diferencia de fase del campo sonoro entre las dos posiciones de micrófono. El punto crítico para el cálculo de la intensidad sonora es la medida del gradiente de fase entre micrófonos. La presión sonora se calcula fácilmente promediando el valor de las presiones medidas por los dos transductores.

Son precisamente los errores que se pueden cometer alrededor de la medida de la fase los que más problemas ocasionan al realizar una medida, sobre todo en las frecuencias más bajas. En el siguiente apartado de este capítulo se van a relacionar los errores más significativos en los que se puede incurrir durante una medida de intensidad sonora.

4.2.- Errores y limitaciones en la medida de la intensidad sonora.

Existen muchas fuentes de error en la medida de la intensidad sonora. Buena parte de las publicaciones de la última década tienen que ver con la identificación, estudio y análisis de cada una de ellas. Algunas de estas fuentes de error son fundamentales, mientras que otras están asociadas a deficiencias técnicas en el manejo de la instrumentación o a la incorrecta aplicación de la técnica de medida.

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

4.2.1.-Error debido a la aproximación por diferencias finitas a alta frecuencia

Las sondas de intensidad del tipo p-p, calculan la velocidad de las partículas determinando el gradiente de presiones entre los dos micrófonos, estando éstos separados una distancia conocida. La distancia de separación de los micros limita el

rango de frecuencia de medida. Para una distancia determinada Δr , habrá un límite en alta frecuencias donde al disminuir la longitud de onda considerablemente se produzca un error significativo en la aproximación por diferencias finitas del gradiente de presión. Este error a alta frecuencia es sistemático por conducir siempre al mismo tipo de imprecisión, en este caso una estimación menor del valor real de la intensidad. Los dos micrófonos aproximan el gradiente de presión por medio de una recta delimitada por la presión sonora en cada punto del espacio donde se encuentran los transductores, como ya se comentó. Si la onda es de longitud pequeña, es decir de alta frecuencia, la estimación será errónea dependiendo de la distancia de separación entre micrófonos. Para una separación efectiva de los micros, habrá un límite en alta frecuencia por encima del cual los errores se incrementarán significativamente. Se puede obtener una precisión de ± 1 dB, si se cumple que la longitud de onda de la señal medida es superior a 6 veces la longitud del espaciador que separa los micrófonos. En la práctica se suelen considerar los siguientes límites superiores en frecuencia para las diferentes distancias estándar de separación de los micrófonos:

50 mm - hasta 1,25 kHz **12 mm** - hasta 5 kHz **6 mm** - hasta 10 kHz

Trabajos recientes, parecen demostrar que el límite superior en frecuencia puede ser extendido al cancelarse el error motivado por la aproximación por diferencias finitas con el efecto de interferencia creado por la propia sonda en el campo sonoro [43]. Las condiciones en las que se da esta circunstancia son muy particulares. En primer lugar, el montaje de los micrófonos sobre la sonda debe ser cara a cara. En segundo lugar y desde el punto de vista práctico, solamente se cumple con micrófonos de media pulgada con un separador de 12 mm. Si se cumplen estos dos requisitos, el límite superior en frecuencia puede extenderse hasta 10 kHz sin cometer un error apreciable. La explicación física es que la resonancia de las cavidades frontales de los micrófonos incrementa el nivel de presión compensando el error cometido en la aproximación por diferencias finitas.

En la práctica los separadores se pueden fabricar en función del ancho de banda que interese y para una aplicación concreta.

En la figura 4.1 se muestra la determinación correcta del gradiente de presión a baja frecuencia. Así mismo, se aprecia el error en la medida cuando la frecuencia de la onda es alta comparada con la separación efectiva de los micrófonos.

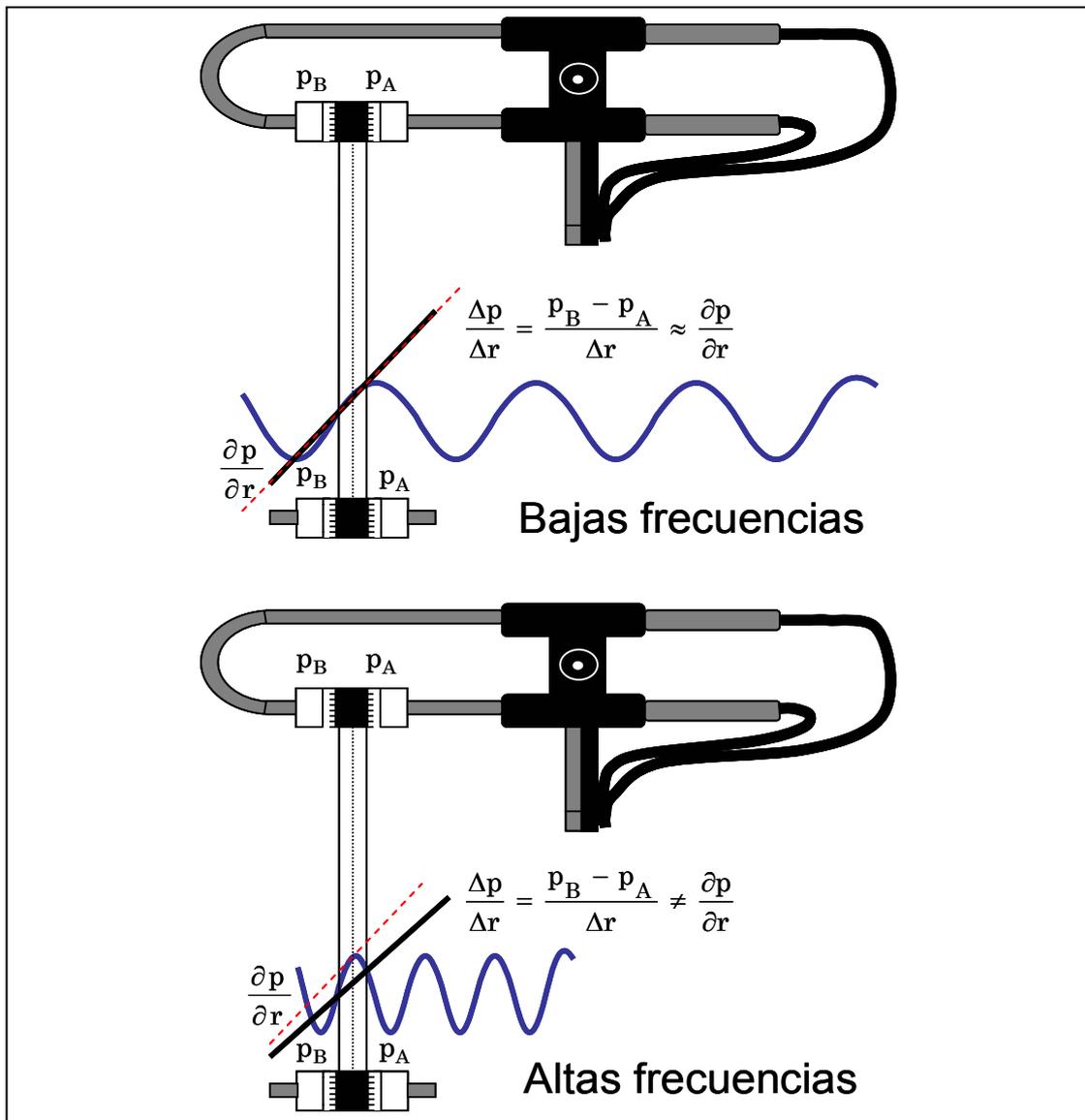


Figura 4.1.- Medida del gradiente de presión a baja y alta frecuencia. A baja frecuencia la aproximación por diferencias finitas es correcta, y a alta frecuencia el error es considerable.

Para una onda sinusoidal plana en campo libre con propagación a lo largo del eje que une los micrófonos de una sonda de intensidad del tipo p-p, se asume que la relación entre la intensidad sonora estimada y la intensidad verdadera I_r , se expresa según la ecuación (4.2), [30].

$$\frac{\hat{I}_r}{I_r} = \frac{\text{sen}(k \cdot \Delta r)}{k \cdot \Delta r} \quad (4.2)$$

En la figura 4.2 se muestra esta relación en decibelios para distintas separaciones de micrófonos. Para medidas de intensidad en entornos con ruido de fondo elevado, es decir en condiciones de campo difuso, el error de aproximación se

asemeja al cometido en condiciones de campo libre. Esto es así, porque la sonda de intensidad solamente es sensible a la energía del campo sonoro que se propaga en la dirección \mathbf{r} , o sea, la componente activa.

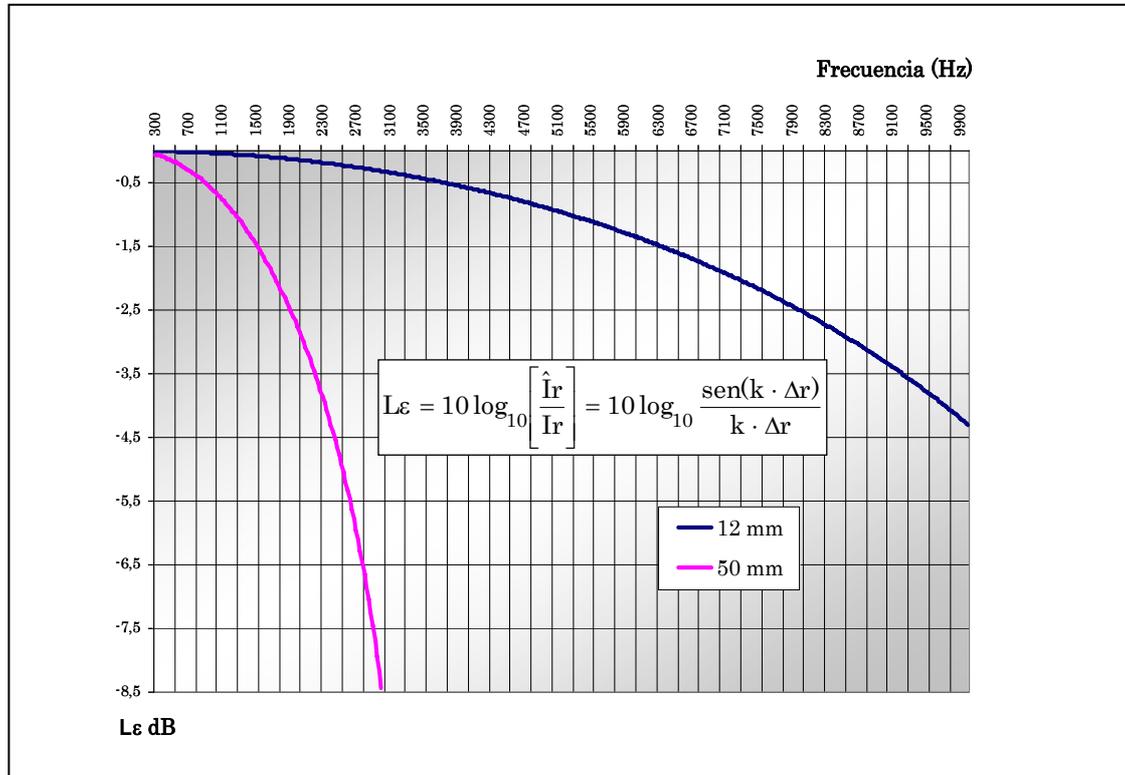


Figura 4.2.- Error cometido, según el tipo de espaciador utilizado de 12 mm ó 50 mm, en la aproximación por diferencias finitas del gradiente de presión.

Si existe un ángulo θ entre la dirección de propagación y la dirección de orientación de la sonda \mathbf{r} , el error de aproximación por diferencias finitas viene dado por la expresión (4.3).

$$\hat{I}_\theta = I_r \frac{\text{sen}(k \cdot \Delta r \cdot \cos \theta)}{k \cdot \Delta r} = I_0 \frac{\text{sen}(k \cdot \Delta r \cdot \cos \theta)}{k \cdot \Delta r \cdot \cos \theta} \quad (4.3)$$

Téngase en cuenta que la distancia efectiva entre micrófonos cuando se comete este error, ver figura 4.11, viene dada por,

$$\Delta r' = \Delta r \cdot \cos \theta$$

Si el ángulo θ entre la propagación del campo sonoro y la orientación de la sonda de intensidad es de 60° por ejemplo, la frecuencia límite para medidas de la intensidad es igual a dos veces la frecuencia límite cuando el ángulo θ es 0° .

Además del error cometido por la desorientación de la sonda en la medida de la fase a alta frecuencia, al cambiar la distancia de separación de los micrófonos, se comete un error también a bajas frecuencias motivado por la disminución de la distancia efectiva que los separa. En un campo sonoro en general, la dirección del flujo de energía acústica debe ser diferente según se oriente la sonda de intensidad. Corregir los valores de la medida de intensidad por medio de la ecuación (4.3) no es aconsejable. La expresión debe utilizarse solo para obtener el límite de frecuencia superior para una distancia de separación concreta de los micrófonos.

4.2.2- Error debido al desajuste de fase de la instrumentación de medida a baja frecuencia

Este tipo de error es el más importante por la limitación que implica a baja frecuencia. La instrumentación de medida existente actualmente en el mercado, por muy precisa que pueda ser, introduce un desfase de medida entre canales.

Teóricamente, el factor diferenciador de la fase medida entre los dos micrófonos de una sonda de intensidad sonora del tipo p-p, debería ser $\phi = \mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{r}$, considerando una onda plana sinusoidal que se propaga en la dirección \mathbf{r} . Esta diferencia de fase entre micrófonos ϕ es debida a la propagación de la onda sonora en el espacio. Por otra parte, cualquier equipo de medida diseñado para obtener la intensidad con este tipo de sonda, tendrá un desfase ϕ entre canales de medida de forma irremediable. Lo que implica que el desfase total estará formado por dos componentes: una debida a la longitud del separador y otra motivada por el error de medida del equipo al no existir un sincronismo perfecto entre los dos canales. El desfase de medida podrá ser positivo o negativo dependiendo del micrófono que se tome como referencia para calcular el gradiente de presiones. La expresión (4.4) representa el error cometido por esta circunstancia [41].

$$\frac{\hat{I}_r}{I_r} = \frac{\text{sen}(\mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{r} \pm \phi)}{\mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{r}} \quad (4.4)$$

Evidentemente, los errores de medida de fase serán más importante cuanto menor sea la longitud del espaciador. Debido exclusivamente, a que la componente $\mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{r}$ se irá haciendo cada vez menor, mientras que ϕ seguirá teniendo el mismo valor, ya que es un factor constante que depende exclusivamente del equipo de medida. La expresión (4.5) muestra el error en decibelios asociado al deficiente

sincronismo de los canales de medida de la instrumentación, pudiéndose adicionar o sustraer el error de fase a la fase real.

$$L\varepsilon = 10 \log_{10} \left[\frac{\hat{I}_r}{I_r} \right] = 10 \log_{10} \left[\frac{\text{sen}(k \cdot \Delta r \pm \varphi)}{k \cdot \Delta r} \right] \quad (4.5)$$

Es importante tener en cuenta, que todos los elementos de la cadena de medida, empezando por los micrófonos, deben aportar el menor desajuste posible entre canales. Para un equipo de medida aceptable, el desfase no debe ser superior a $0,35^\circ$. En la figura 4.3 y en la figura 4.4, se muestra el error cometido a baja frecuencia debido al espaciador utilizado y con un desajuste de fase de $\varphi = 0,25^\circ$.

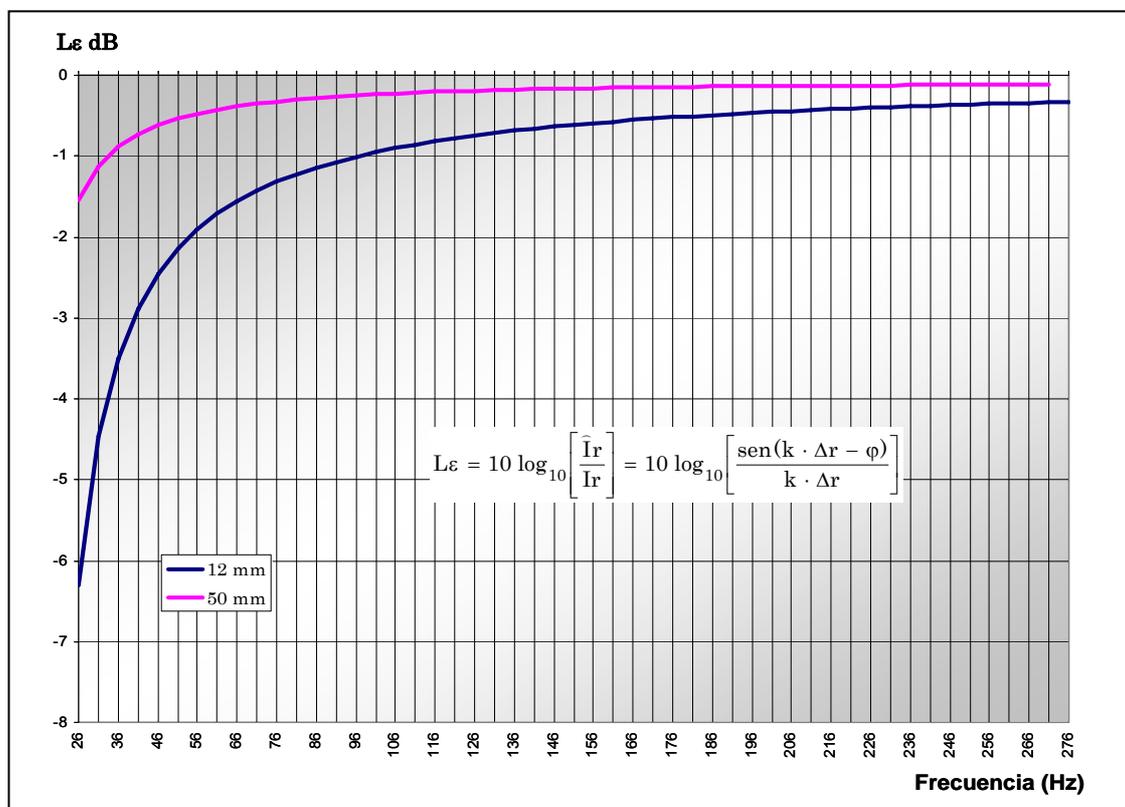


Figura 4.3.- Error cometido al restarse el desfase entre canales del equipo de medida con $\varphi = 0,25$ para separadores de 12 mm y 50 mm.

Para evaluar el error se tendrá en cuenta que dependiendo del micrófono que se considere de referencia, el desfase se puede adicionar a la variación de la fase, debida a la distinta ubicación espacial de los micrófonos, o bien se puede restar. Esta circunstancia de poder sumarse o sustraerse el error, permite definir un procedimiento para corregirlo, que consiste en realizar dos medidas permutando los micrófonos y obtener la media aritmética de las dos medidas. Éste es uno de los

procedimientos prácticos empleados en la corrección del desajuste de fase originado por la instrumentación de medida [41].

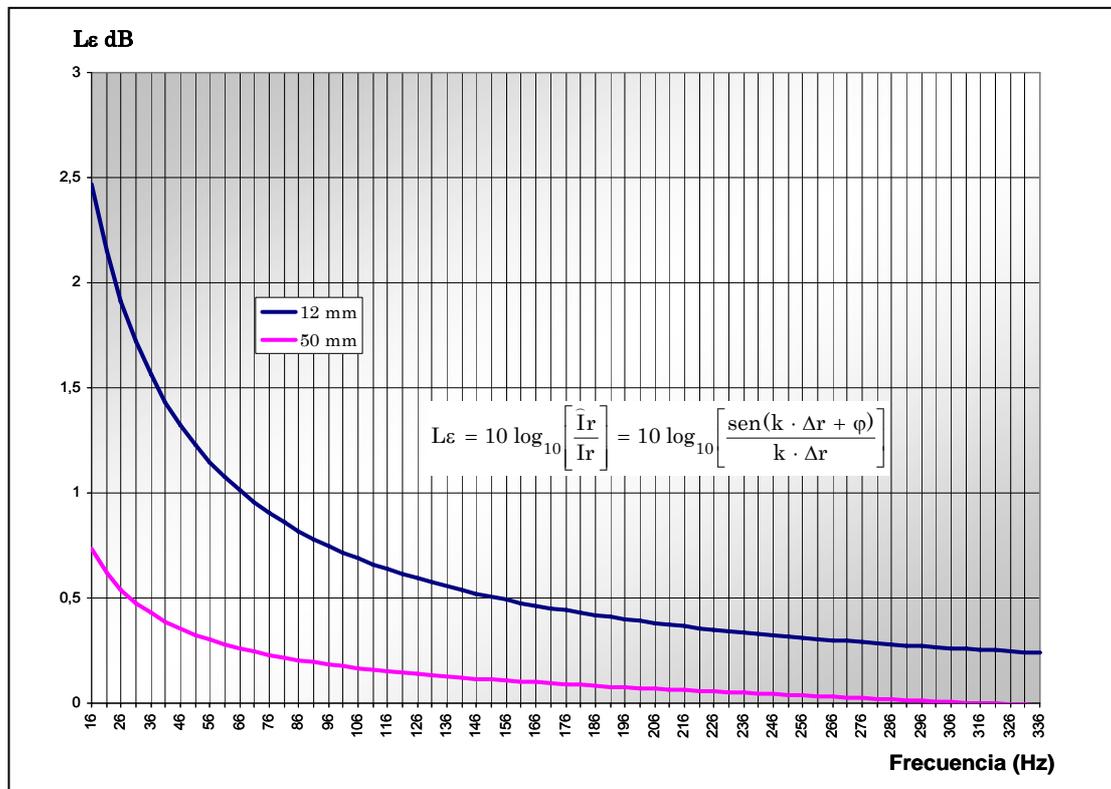


Figura 4.4.- Error cometido al adicionarse el desfase entre canales del equipo de medida con $\varphi=0,25$ para separadores de 12 mm y 50 mm.

Para evitar el error de fase a bajas frecuencias es necesario utilizar espaciadores de micrófono de la mayor longitud posible. Aunque se mida con un equipo con desfase entre canales mínimo, se puede cometer un error considerable en la estimación de la intensidad sonora a baja frecuencia si se utiliza un espaciador de longitud excesivamente corta. Por lo tanto, en primer lugar se debe elegir la longitud del separador correctamente y a continuación un equipo de calidad.

4.2.3.-Limitaciones en frecuencia de los espaciadores comerciales de micrófonos

En la figura 4.5 se muestra gráficamente la idoneidad de los distintos separadores (6 mm, 12 mm y 50 mm) en función de la frecuencia de la onda sonora. Analizando detenidamente la figura, se puede deducir que será necesario utilizar en numerosas ocasiones dos separadores distintos para realizar una medida, dependiendo del ancho de banda que se considere de interés.

De una parte, cada separador tendrá limitada su frecuencia superior debido al error cometido en la aproximación por diferencias finitas para determinar el gradiente de presión. Por otra parte, cada separador tendrá limitada su frecuencia inferior, debido a la incidencia del desajuste de fase del equipo en la medida del gradiente de fase de la onda con respecto a la posición de cada micrófono.

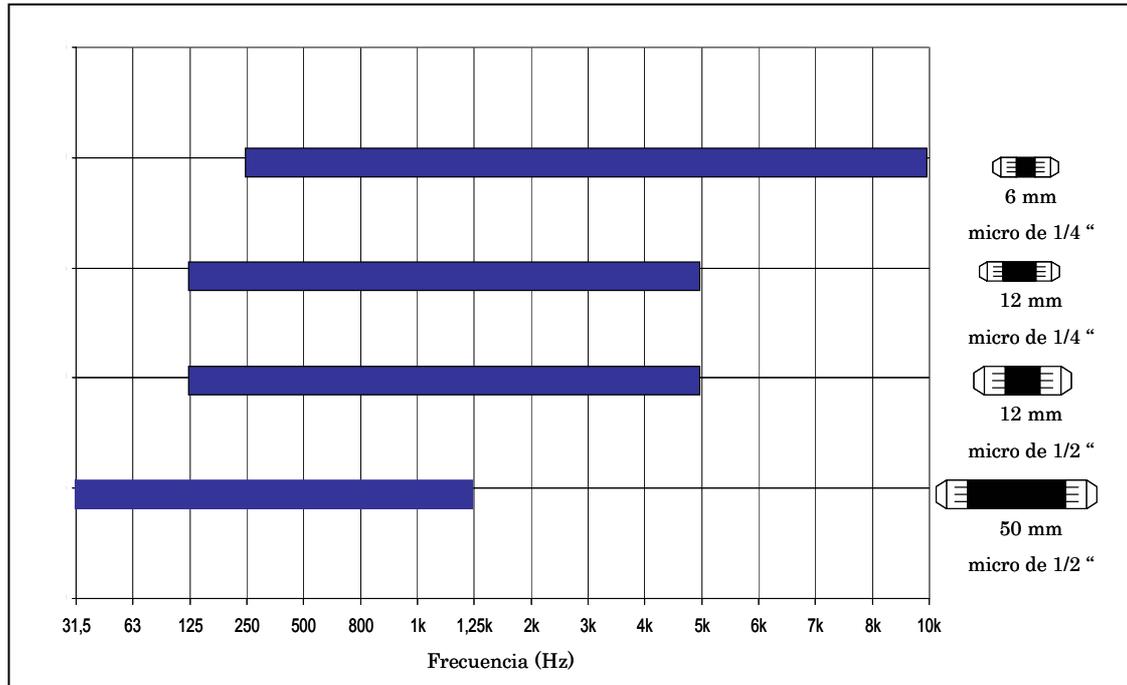


Figura 4.5.- Limitaciones en frecuencia en la medida de la intensidad sonora en función de los distintos tamaños comerciales del separador de los micrófonos. Las medidas a baja frecuencia deben realizarse con el separador de 50 mm, mientras que a alta frecuencia el ideal es el de 6 mm.

Utilizando los separadores de micrófono especificados en la figura 4.5 el error máximo cometido no excederá de ± 1 dB. En función del ancho de banda objeto de estudio, se pueden fabricar separadores de distintos tamaños cumpliendo los requisitos mencionados en los apartados anteriores, siendo el error cometido igualmente inferior a ± 1 dB.

4.2.4.- Limitaciones en frecuencia debidas al índice de reactividad.

Nomograma de intensidad sonora.

Se demostró en el capítulo 3, que en el dominio de la frecuencia la intensidad sonora puede ser calculada desde la parte imaginaria del espectro cruzado. Para ello, se necesita un analizador multicanal que permita obtener la FFT de las dos señales de los micrófonos.

$$\hat{\Gamma}_r = -\frac{\text{Im } G_{AB}}{\omega \cdot \rho \cdot \Delta r}$$

Donde, ω es la frecuencia circular y ρ es la densidad del aire. La formulación general del espectro cruzado es,

$$G_{AB} = E[A^* B] = E[|A||B|(\cos \Phi_{BA} + j \text{sen } \Phi_{BA})]$$

Donde E representa la esperanza matemática, es decir, el valor promediado resultante del procesado del espectro cruzado. Relacionando las dos expresiones anteriores y teniendo en cuenta que el ángulo puede ser pequeño ($\text{sen} \Phi_{AB} \approx \Phi_{AB}$), se obtiene,

$$-\hat{\Gamma}_r \cdot \omega \cdot \rho \cdot \Delta r = [|A||B|(\text{sen } \Phi_{BA})] \approx p_{\text{RMS}}^2 \cdot \Phi_{AB}$$

Apréciese, que j ha sido eliminada porque se asume que se trabaja con la parte imaginaria del espectro cruzado. Teniendo en cuenta que, $\omega = k \cdot c$, finalmente la ecuación puede ser escrita como,

$$-\hat{\Gamma}_r \cdot (k \cdot c) \rho \cdot \Delta r = p_{\text{RMS}}^2 \cdot \Phi_{AB}$$

$$\hat{\Gamma}_r = -\frac{p_{\text{RMS}}^2}{\rho \cdot c} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{\Phi_{AB}}{\Delta r} \quad (4.6)$$

Si se compara la expresión (4.6) con la expresión (4.1), se aprecia que el gradiente de fase $\partial\Phi/\partial r$ es sustituido por la aproximación finita $\Phi_{AB}/\Delta r$. Cuando el campo sonoro posee una componente reactiva apreciable, la medida de la fase entre micrófonos se ve dificultada. El campo sonoro difuso en el que se realiza la medida va a provocar que la fase entre señales Φ_{AB} , sea menor que la fase de ambos micrófonos en condiciones de campo libre $\phi = k \cdot \Delta r$. La relación entre ambas fases se define como el índice de reactividad K del campo sonoro.

$$K = \frac{k \cdot \Delta r}{\Phi_{AB}}$$

Retomando la expresión (4.6) podemos obtener una nueva ecuación que permita cuantificar como de reactivo es un campo sonoro. Así como las limitaciones en frecuencia que origina el error en la medida de la fase.

$$K = \frac{k \cdot \Delta r}{\Phi_{AB}} = - \frac{p_{RMS}^2 / \rho \cdot c}{\hat{I}_r}$$

Tomando logaritmos y considerando que la impedancia del medio tiene un valor aproximado de $\rho \cdot c = 400$, con las referencias usuales.

$$10 \log_{10} K = 10 \log_{10} \frac{\hat{I}_r}{p_{RMS}^2 / \rho \cdot c}$$

$$L_K = 10 \log_{10} \frac{\hat{I}_r}{p_{RMS}^2 / \rho \cdot c} = 10 \log_{10} (I_r) - 10 \log_{10} \left(\frac{p_{RMS}^2}{\rho \cdot c} \right)$$

Multiplicando y dividiendo los términos de la ecuación anterior por los valores de referencia de la presión y la intensidad, se obtiene sus respectivos niveles en dB,

$$L_K = 10 \log_{10} \left(I \cdot \frac{I_0}{I_0} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{p_{RMS}^2}{\rho \cdot c} \cdot \frac{p_0^2}{p_0^2} \right)$$

$$L_K = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{p_{RMS}^2}{p_0^2} \right) + 10 \log_{10} \left(I_0 \frac{\rho \cdot c}{p_0^2} \right) = L_I - L_p$$

El último término es cero, como se puede apreciar al sustituir los valores de las constantes,

$$10 \log_{10} \left(I_0 \frac{\rho \cdot c}{p_0^2} \right) = 10 \log_{10} \left(10^{-12} \frac{400}{(20 \cdot 10^{-6})^2} \right) = 0$$

No siempre este término, es absolutamente nulo, debido a que la impedancia del medio, depende de la presión y temperatura atmosférica. Es decir, va a influir el lugar geográfico donde se realiza la medida y la temperatura local en el momento de medir. Factores a tener en cuenta durante el proceso de la calibración de la sonda.

El índice de reactividad se suele expresar como se muestra en (4.7), siendo este índice un valor negativo. En un campo sonoro reactivo, el nivel de presión sonora será mayor que el nivel de intensidad. En condiciones de campo libre, campo sonoro activo puro, la diferencia entre niveles de intensidad y presión es cero.

$$L_K = L_I - L_p \quad (4.7)$$

Los nomogramas representados por las figuras 4.6 y 4.7 son muy útiles para determinar los límites a baja frecuencia para separadores de micrófono de 12 mm y 50 mm. Este límite, depende también del desajuste de fase entre canales del equipo de medida.

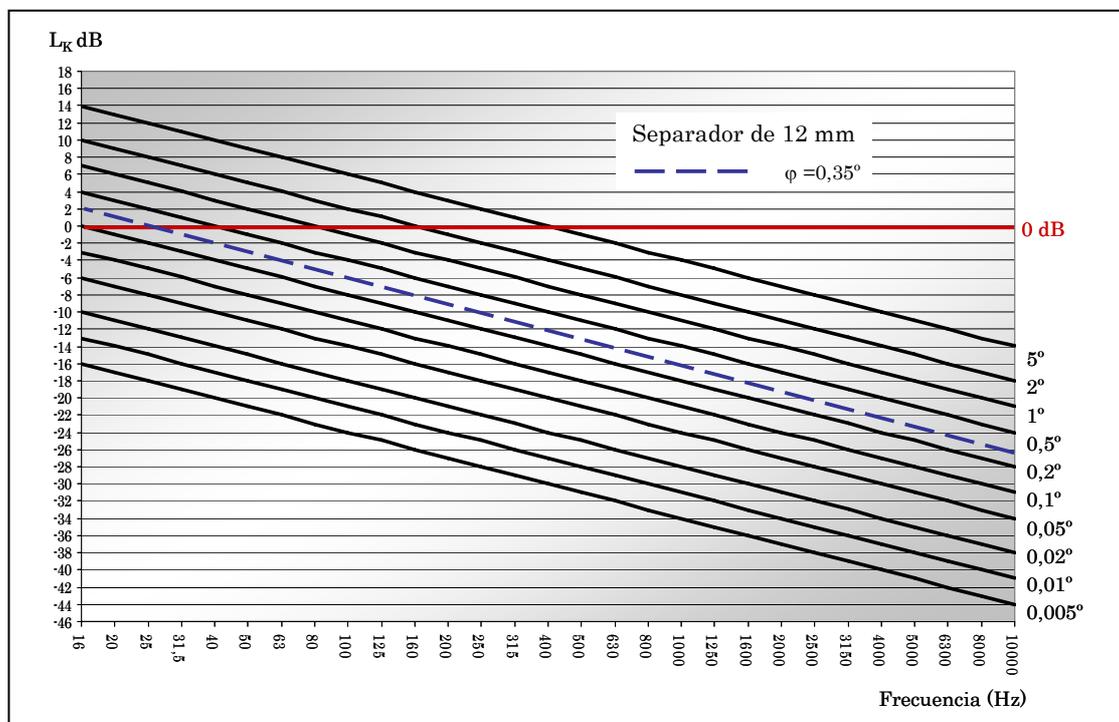


Figura 4.6.- Índice de reactividad L_K frente a la frecuencia para un separador de 12 mm y un desajuste de fase entre canales del equipo de medida de $\varphi = 0,35$.

Para un índice de reactividad de 0 dB, es decir condiciones de campo libre, el nivel de intensidad y presión sonora coinciden $L_p = L_I$. Utilizando el nomograma de la figura 4.6, se puede determinar la diferencia de fase en la propagación de un campo sonoro activo puro para cada una de las frecuencias a medir. Por ejemplo, si se utiliza un espaciador de micrófonos de 12 mm, el desfase del campo sonoro aproximado entre la posición de los dos micrófonos a 400 Hz es de 5°, o bien, de 2° a 200 Hz, siempre para una misma orientación de la sonda de intensidad sonora en la dirección de propagación de la onda.

En la figura 4.7 se muestra el nomograma correspondiente a un separador de 50 mm. Con este separador la diferencia de fase en condiciones de campo libre para 100 Hz es de 5° aproximadamente, igualmente para 40 Hz es de 2°. Resulta evidente que para separadores largos se cuenta con mayor margen de error de fase a baja frecuencia.

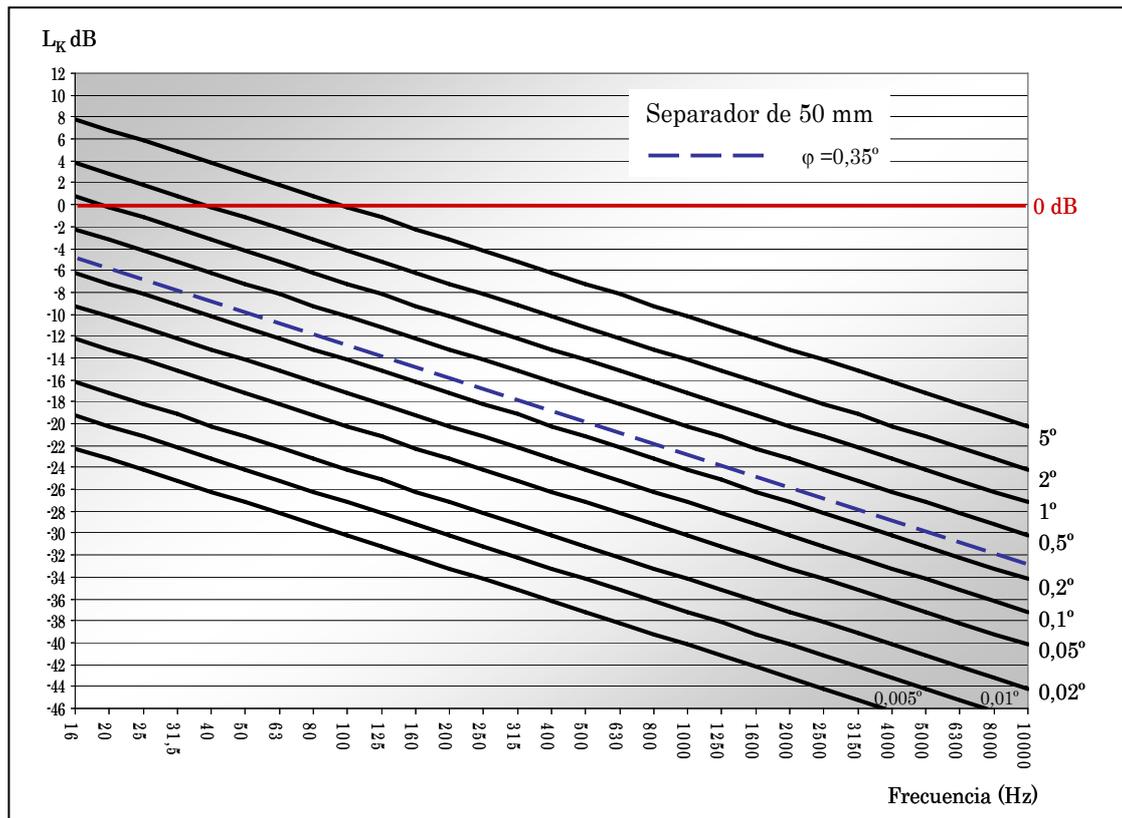


Figura 4.7.- Índice de reactividad L_K frente a la frecuencia para un separador de 50 mm y un desajuste de fase entre canales del equipo de medida de $\varphi = 0,35$.

Cuando el campo sonoro posee una componente reactiva considerable, el nivel de presión sonora es mayor que el nivel de intensidad sonora. La diferencia entre ambos niveles es el índice que mide la reactividad del campo, siempre y cuando se mantenga una correcta orientación de la sonda de intensidad. Esta circunstancia modifica la diferencia de fase que puede medirse en el campo sonoro. Por ejemplo, con un índice de reactividad de $L_K = -10$ dB y un separador de micrófonos de 12 mm, en la figura 4.8 se aprecia que la diferencia de fase a 400 Hz es de $0,5^\circ$. Con un índice de reactividad de -20 dB, la diferencia de fase es solamente de $0,05^\circ$.

La diferencia de fase entre micrófonos ϕ y el desajuste de la fase φ atribuible a la instrumentación de medida, se tendrá en cuenta en el procedimiento de cálculo de la intensidad sonora (4.8), cometiendo un error evidente de medida. Dicho error resulta más crítico a baja frecuencia y con un elevado índice de reactividad K .

$$\Phi = \phi + \varphi \quad (4.8)$$

Como referencia práctica, en la medida de un campo sonoro reactivo debe tenerse en cuenta que la diferencia de fase entre micrófonos ϕ , tiene que ser al

menos 5 veces mayor que el desajuste de fase del sistema de medida φ , de esta forma se asegura una precisión de ± 1 dB.

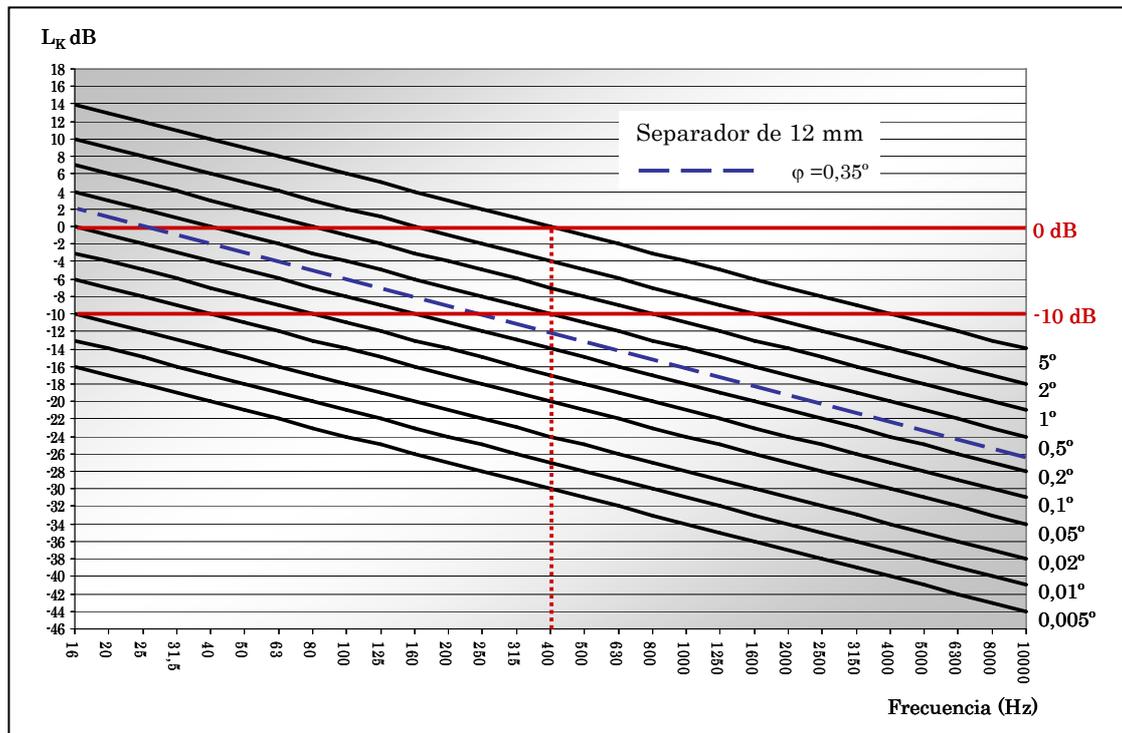


Figura 4.8.- Variación de la fase entre micrófonos con un índice de reactividad $L_K = -10$ dB y un separador de micrófonos de 12 mm.

Un equipo tecnológicamente aceptable debe tener un desfase menor de $0,35^\circ$. La intensidad sonora medida puede ser infravalorada o sobreestimada de acuerdo con el signo del mal emparejamiento de fase $\pm \varphi$, es decir, de acuerdo con el orden en el que se toman las señales de los micrófonos para hallar el gradiente de presiones. Si se utiliza, por ejemplo, un espaciador de micrófonos de 12 mm y se está midiendo la intensidad sonora a 63 Hz en condiciones de campo libre, según el nomograma de la figura 4.8, la fase entre micrófonos es aproximadamente de $0,8^\circ$. Como el mal emparejamiento de fase es de $0,35^\circ$ el error que se comete es significativo. Para que la precisión sea de ± 1 dB, la diferencia de fase entre micrófonos debería ser al menos cinco veces el desajuste de fase del sistema, es decir $0,35 \times 5 = 1,75^\circ$. Realmente con un separador de 12 mm y con $\varphi = 0,35$ no se puede medir con precisión la intensidad sonora a 63 Hz. Teniendo en cuenta esta circunstancia, si no se cambia el separador de los micrófonos las medidas solo tendrán una precisión de ± 1 dB para frecuencias de 160 Hz en adelante. Si se cambia el separador de micrófonos por uno de 50 mm, entrando en el nomograma de la figura 4.7, la fase entre micrófonos a 63 Hz es

aproximadamente de $3,3^\circ$. Este ejemplo, es válido para condiciones de campo libre, no obstante, se puede concluir que en general los espaciadores de micrófono largos son los ideales para medir a bajas frecuencias, incluso en campos con índice de reactividad elevado.

Apréciese que el índice de reactividad es negativo. Los valores positivos de L_K de las figuras 4.6, 4.7 y 4.8, no se pueden dar en la práctica. En un campo sonoro reactivo, siempre será mayor el nivel de presión sonora que el nivel de intensidad sonora. El índice de reactividad del campo sonoro L_K , también denominado δ_{pI} , no es un parámetro que cuantifica de forma exclusiva la reactividad de dicho campo. El valor de L_K no distingue entre las causas que producen la presencia de una componente reactiva, ya que el nivel de presión sonora L_p puede ser mayor que el nivel de L_I por varias razones, entre otras:

- ✓ Cuando un campo sonoro posee dos partes no correlacionadas de igual importancia: un campo que se propaga en una dirección dada y otro campo difuso. En este caso, suponiendo que la dirección de propagación neta de la energía de la onda y la dirección de la orientación de la sonda es la misma, el valor del índice de reactividad se debe al ruido de fondo aportado por el campo difuso.
- ✓ Cuando en condiciones de campo se mide la intensidad sonora orientando la sonda en una dirección distinta a la de propagación. Por ejemplo, cuando el ángulo entre la dirección de propagación y el eje de la sonda es de 60° . El valor del índice de reactividad no es cero, ya que se está midiendo la componente de la intensidad sonora proyectada sobre la dirección que une el centro de los micrófonos con la fuente sonora, que es manifiestamente inferior al nivel de intensidad que se hubiera medido de haber orientado correctamente la sonda.

El primer caso representa la presencia de un campo con una componente reactiva importante y el segundo está relacionado con la orientación de la sonda con respecto al campo sonoro. Si el sonido incide con un cierto ángulo respecto al eje de la sonda, la diferencia de fase detectada es más pequeña que la que correspondería si coincidiera la orientación de la sonda con la dirección de propagación de la onda. En otras palabras, la distancia efectiva del espaciador se reduce. Debido a la diferencia de fase, figura 4.9, se produce una disminución de intensidad sonora reducida por el factor $\cos \theta$. Pero la presión al ser una magnitud escalar es la misma para cualquier

ángulo de incidencia. He aquí una causa que puede diferenciar los niveles de presión e intensidad sonora, en un campo activo puro.

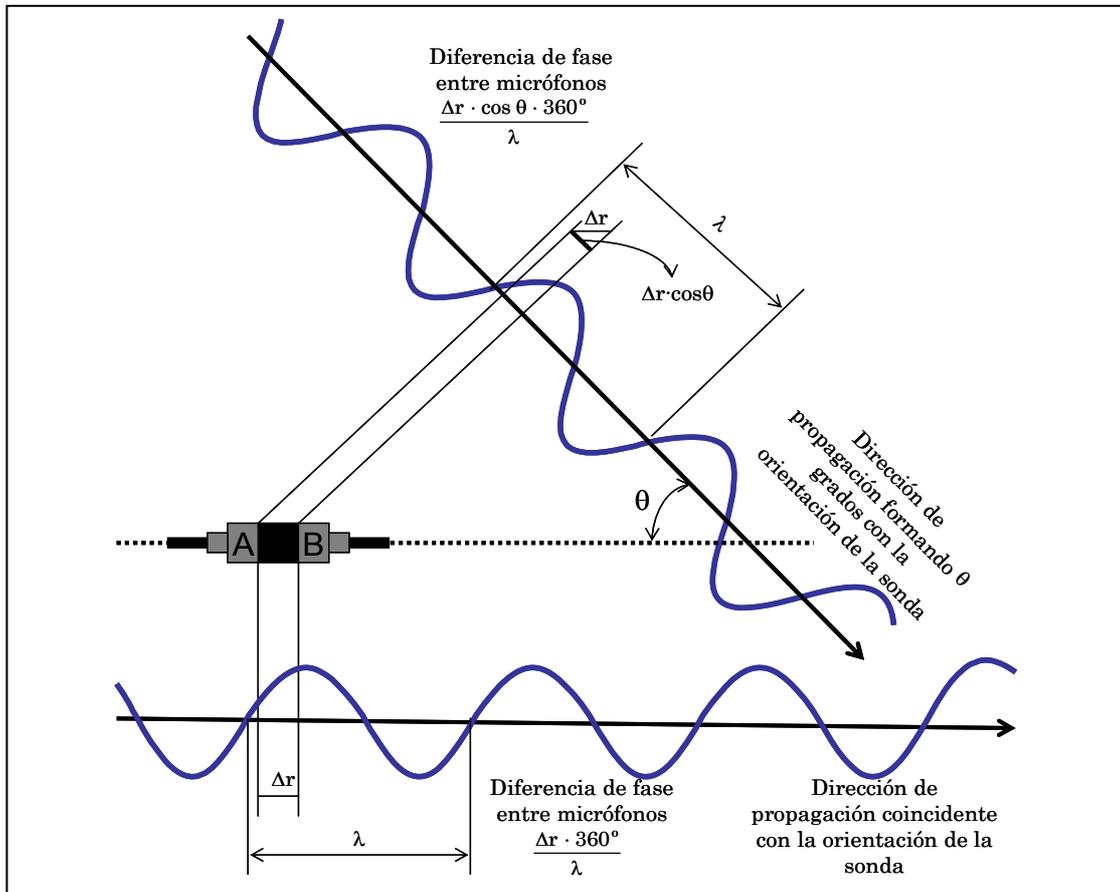


Figura 4.9.- Una incorrecta orientación de la sonda disminuye la distancia efectiva entre micrófonos. La intensidad sonora medida es menor debido a la mala orientación de la sonda.

Además, en este caso el error generado por un mal emparejamiento de fase ϕ resulta aún más importante, reduciéndose el margen de medida a baja frecuencia. Las figuras 4.6 y 4.7 son útiles para determinar si el error por desajuste de fase ϕ entre canales de la instrumentación de medida, representado en los nomogramas por la línea de $0,35^\circ$, es suficientemente significativo frente a la diferencia de fase ϕ entre los micrófonos de la sonda que ha sido mal orientada.

4.2.5.- Limitaciones a baja frecuencia debidas al desajuste de fase de la instrumentación y al índice de reactividad

Si la diferencia de fase entre micrófonos $k \cdot \Delta r$ es pequeña y el desajuste de fase ϕ existente entre los dos canales de medida también, la relación entre los

valores de la intensidad medida y la intensidad real para condiciones de campo libre, viene dada por (4.9).

$$\frac{\hat{I}}{I} = \frac{\text{sen}(k \cdot \Delta r \pm \varphi)}{k \cdot \Delta r} \approx \frac{(k \cdot \Delta r \pm \varphi)}{k \cdot \Delta r} \quad (4.9)$$

Para el caso más general, donde las condiciones de campo libre no pueden ser asumidas, la ecuación (4.9) se sustituye por la (4.10).

$$\frac{\hat{I}}{I} \approx \frac{(\phi \pm \varphi)}{\phi} \quad (4.10)$$

Recordando la expresión del índice de reactividad K ,

$$K = \frac{k \cdot \Delta r}{\Phi} \quad \text{y} \quad L_K = 10 \log K = L_I - L_P$$

Sustituyendo,

$$L_K = 10 \log K = 10 \log \frac{k \cdot \Delta r}{\Phi}$$

Despejando la fase y teniendo en cuenta que L_K es negativo,

$$\Phi = 10^{L_K/10} \cdot (k \cdot \Delta r)$$

Ahora bien, la fase total estará compuesta por dos términos: la diferencia de fase entre los micrófonos ϕ y el desajuste de fase del equipo de medida $\pm \varphi$. Sustituyendo en la expresión anterior,

$$\Phi = \phi \pm \varphi = 10^{L_K/10} \cdot (k \cdot \Delta r) \quad (4.11)$$

Si no existe desajuste de fase φ imputable a la instrumentación, al aplicar la misma señal sonora a los dos micrófonos el equipo de medida debería detectar intensidad cero. Sin embargo, el mal emparejamiento de fase provoca una pequeña diferencia entre las dos señales, obteniéndose una intensidad neta. Esta intensidad, conocida como residual L_{LR} , no es constante respecto de la amplitud de la señal aplicada, varía con el nivel de presión $L_{p,R}$. Lo que sí permanece constante es la diferencia entre los niveles de presión e intensidad al aplicar la misma señal a ambos canales [30].

$$L_{K,0} = L_{I,R} - L_{p,R} \quad (4.12)$$

El parámetro $L_{K,0}$ se denomina índice de intensidad residual. Se puede medir por medio de un pequeño adaptador que proporciona la misma señal a los dos micrófonos y un generador de ruido patrón, figura 4.10. También se suele representar como, δ_{p10} .

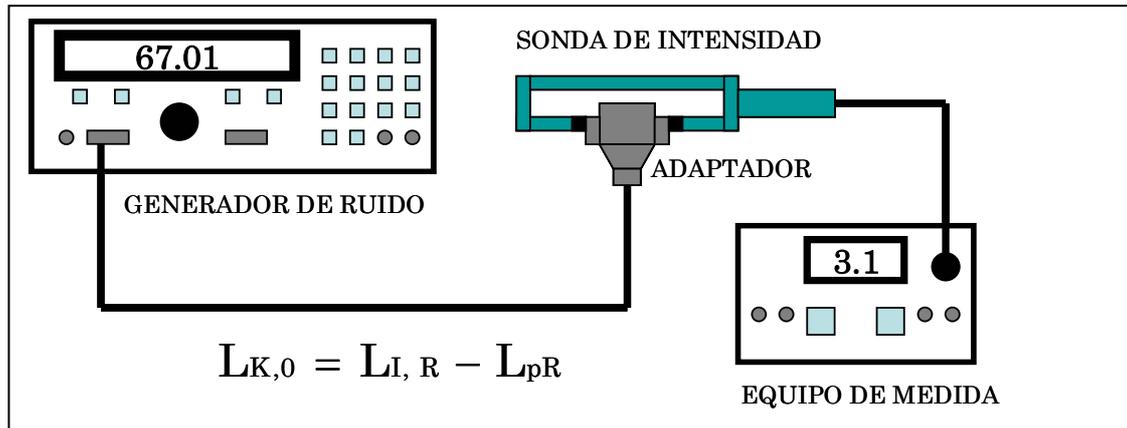


Figura 4.10. - Determinación experimental del índice de intensidad residual. La sonda es conectada a una señal patrón donde ambos micrófonos reciben la misma señal.

Teniendo en cuenta que en el proceso de obtención experimental del índice de intensidad residual $L_{K,0}$, véase la figura 4.10, la fase se puede representar mediante la expresión (4.13).

$$\phi = 10^{L_{K,0}/10} \cdot (k \cdot \Delta r) \quad (4.13)$$

La diferencia de fase entre micrófonos debida al campo sonoro se puede obtener ahora teniendo en cuenta la ecuación (4.11).

$$\phi = 10^{L_{K,0}/10} \cdot (k \cdot \Delta r) \mp 10^{L_{K,0}/10} \cdot (k \cdot \Delta r) \quad (4.14)$$

Sustituyendo las expresiones (4.13) y (4.14) en la relación (4.10), se obtiene el error de medida debido al desajuste de fase del equipo.

$$\frac{\hat{I}}{\bar{I}} = \frac{10^{L_{K,0}/10} \cdot (k \cdot \Delta r)}{10^{(L_{K,0}/10)} \cdot (k \cdot \Delta r) \mp 10^{(L_{K,0}/10)} \cdot (k \cdot \Delta r)} = \frac{1}{1 \mp 10^{(L_{K,0} - L_{K,0})/10}}$$

De forma logarítmica,

$$L_{\varepsilon, \text{fase}} = -10 \log_{10} \left[1 \mp 10^{(L_{K,0} - L_{K,0})/10} \right] \quad (4.15)$$

La ecuación (4.15) indica que el error por desajuste de fase, depende de la diferencia de nivel entre el índice de intensidad residual del sistema de medida y el índice de reactividad medido en el campo sonoro en las posiciones de los micrófonos. En la figura 4.11 se muestra de forma gráfica lo mencionado anteriormente.

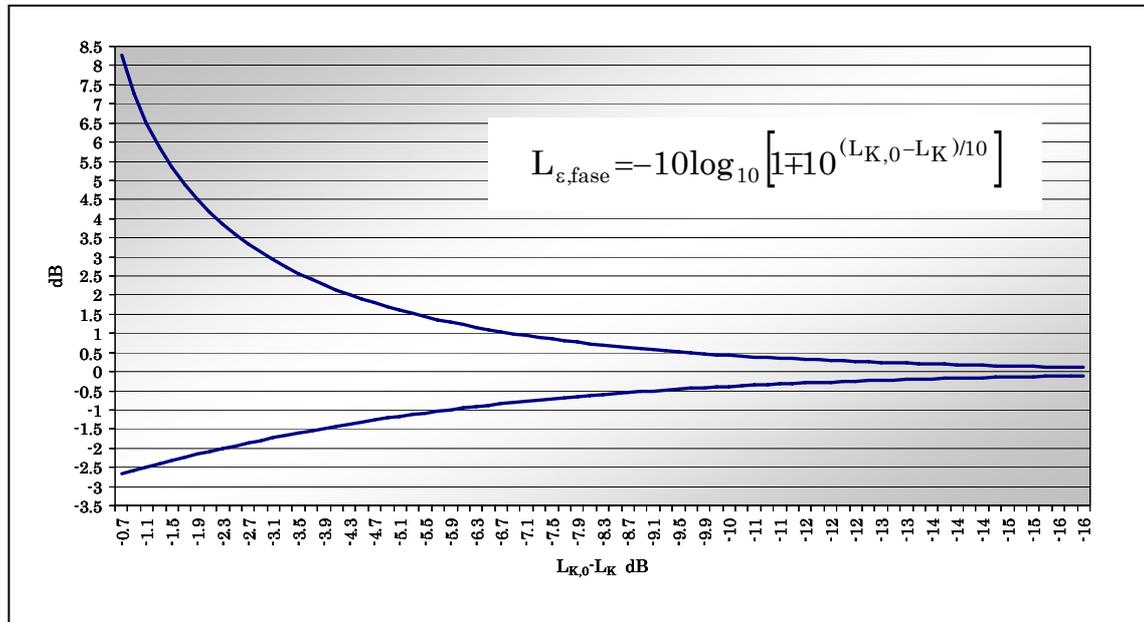


Figura 4.11.- Error por desajuste de fase en la medida de la intensidad sonora.

En la figura 4.11 se aprecia que para una precisión de ± 1 dB, la diferencia entre el índice de intensidad residual $L_{K,0}$ y el índice de reactividad L_K no puede ser mayor de 7 decibelios. Por lo tanto, añadiendo 7 dB al índice de intensidad residual se obtiene lo que se conoce como la capacidad dinámica L_d , que representa el límite del índice de reactividad tolerable en una medida para que la precisión sea la indicada. Si se adicionan 10 dB al índice de intensidad residual, la precisión será de 0,5 dB. El punto de corte entre la curva que define el índice de reactividad con el índice de intensidad residual al que se le ha adicionado los 7 dB, limita el rango de medida a baja frecuencia.

En la figura 4.12 se muestra como determinar el límite inferior de frecuencia con un ejemplo. Se aprecia en la figura que el límite a baja frecuencia se encuentra a 125 Hz, estando relacionado no solo con la calidad del equipo de medida en cuanto a su desajuste de fase, sino también con las condiciones del campo sonoro cuantificado por el índice de reactividad. La capacidad dinámica de un sistema de medida de intensidad, identifica las frecuencias donde el índice de reactividad está por encima

del índice de intensidad residual incrementado 7 dB o 10 dB, según el grado de precisión. La frecuencia donde esta situación se invierte, es la mínima frecuencia a la que podemos medir con ciertas garantías de precisión. Apréciese, que en la práctica tanto el índice de intensidad residual, el índice de reactividad o la capacidad dinámica, serán valores negativos.

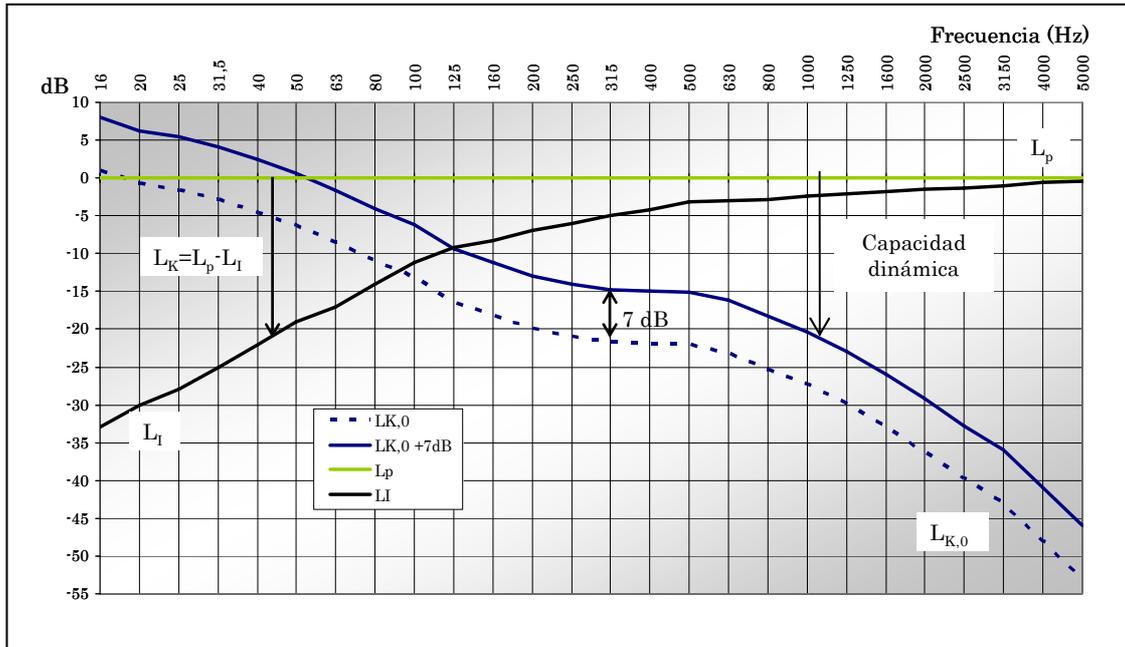


Figura 4.12. Determinación de la capacidad dinámica teniendo en cuenta el índice de intensidad residual y el índice de reactividad para una precisión de ± 1 dB.

Además, la normativa internacional cataloga como grado de control el incremento de 7 decibelios del índice de intensidad residual, que implica una precisión de ± 1 dB. El grado de ingeniería supone un incremento de 10 dB, siendo la precisión de ± 0.5 dB en este caso [44].

4.2.6.- Error de medida debido a la presencia de la propia sonda de intensidad en el campo sonoro

La ecuación (4.2) es correcta en el caso de una sonda de intensidad ideal que no altere el campo sonoro. En otras palabras, la interferencia de los micrófonos en el campo sonoro no se tiene en cuenta. Dicha ecuación se puede utilizar solo si los micros son pequeños comparados con la distancia que los separa. En alta frecuencia se conoce la existencia de errores de medida motivados por la aproximación por diferencias finitas y por la presencia física de la misma sonda en el campo sonoro.

Como ya se comentó anteriormente, estudios relativamente recientes [43] demuestran que ambos efectos se cancelan mutuamente utilizando un separador de 12 mm y una configuración de micrófonos cara a cara, pudiéndose extender la medida a alta frecuencia hasta los 10 kHz, figura 4.13.

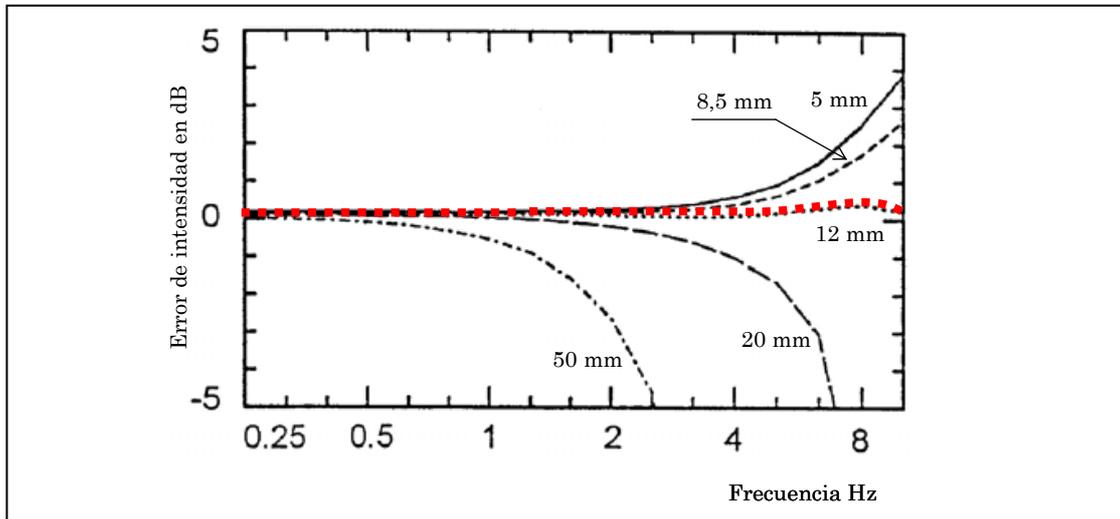


Figura 4.13.- Compensación del error a alta frecuencia con separador de micrófonos de 12 mm.

4.2.7.- Error de medida en el campo próximo

Como el campo sonoro generado por una fuente monopolar se propaga según ondas esféricas, figura 4.14, el error derivado de encontrarse la sonda de intensidad en el campo próximo de la fuente sonora se puede determinar fácilmente.

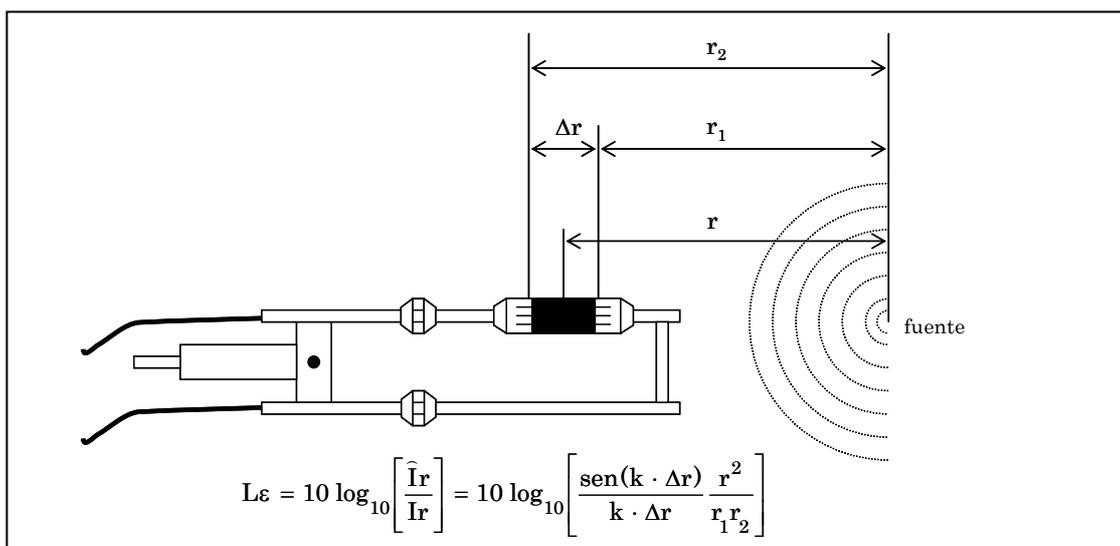


Figura 4.14.- Error cometido en la medida de la intensidad en el campo próximo de una fuente sonora.

La relación entre la intensidad medida y la intensidad verdadera, puede calcularse por medio de la expresión (4.16). El error que se comete condiciona la distancia de medida entre la sonda de intensidad y la fuente sonora [29].

$$\frac{\hat{I}_r}{I_r} = \frac{\text{sen}(k \cdot \Delta r)}{k \cdot \Delta r} \frac{r^2}{r_1 \cdot r_2} = \left(\frac{\text{sen}(k \cdot \Delta r)}{k \cdot \Delta r} \right) \left(1 - \frac{\Delta r^2}{4 \cdot r^2} \right)^{-1} \quad (4.16)$$

Realmente se puede considerar para una fuente monopolar, que en el campo próximo tenemos propagación de ondas esféricas, luego la expresión anterior vale para determinar el error cometido por proximidad a la fuente, teniendo en cuenta que dicho error depende no solo de $k \cdot \Delta r$, sino que depende también de $\Delta r/r$ según se aprecia en la figura 4.15.

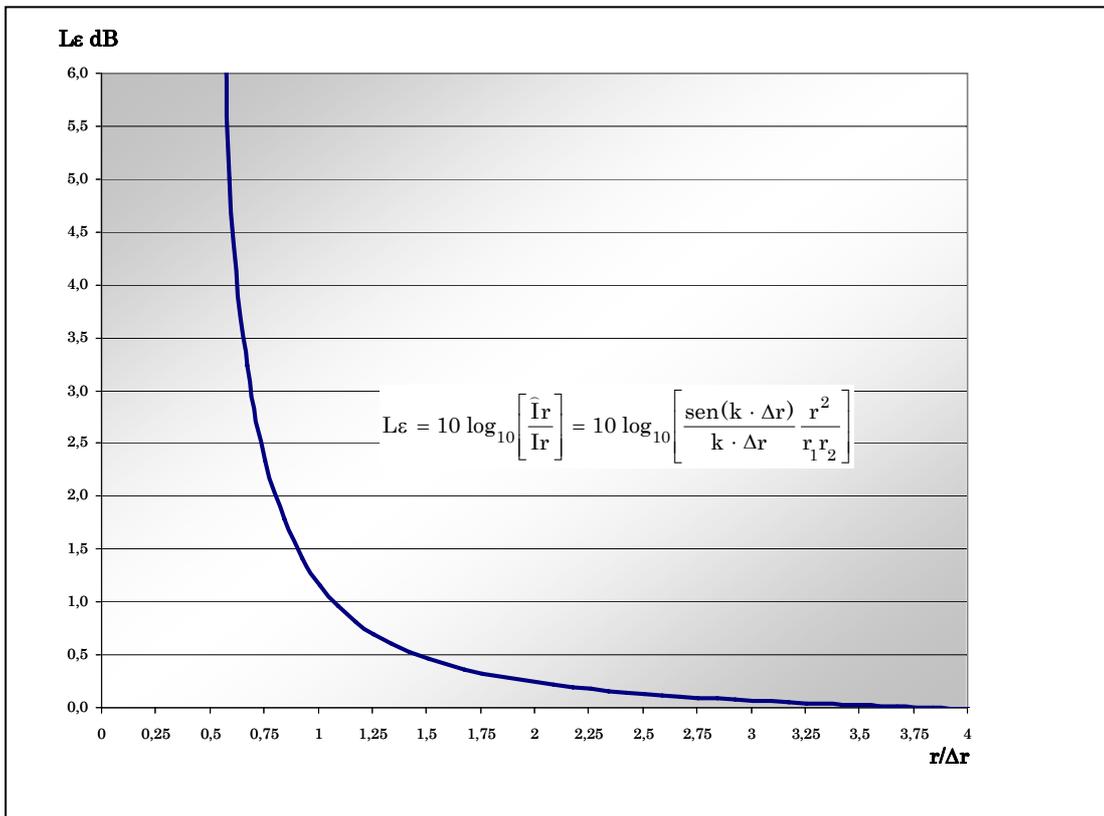


Figura 4.15.- Error cometido en la medida de la intensidad sonora en función de la distancia de medida y la longitud del espaciador.

De la figura anterior, podemos concluir que si la distancia entre la sonda y el centro acústico de los diferentes tipos de fuente, cumple con la condición de que $r > 2\Delta r$, el error cometido se considera despreciable. Normalmente una fuente real, como puede ser una máquina, está constituida por un gran número de pequeñas

fuentes sonoras, por lo que la distancia de medida entre la sonda y la fuente en estudio debe ser mayor. La distancia entre la sonda y el centro acústico de la fuente, según que la fuente sea monopolar, dipolar o cuadripolar [29], se puede apreciar en la tabla 4.1 para un error inferior a ± 1 dB.

Tabla 4.1.- Error de proximidad en función de la longitud del espaciador y según el tipo de fuente.

TIPO DE FUENTE SONORA	Error de proximidad menor de 1 dB para r
MONOPOLAR	$>1,1 \Delta r$
DIPOLAR	$>1,6 \Delta r$
CUADRIPOLAR	$>2,3 \Delta r$

De la tabla anterior se extrae una conclusión evidente, las medidas de intensidad pueden realizarse en el campo próximo con fuentes sonoras complejas sin cometer errores significativos. En la tabla 4.2, para un error inferior a 1 dB, se muestra la separación mínima para los distintos tipos de fuente utilizando los separadores de 12 mm y 50 mm.

Tabla 4.2.- Distancia de separación mínima utilizando separadores de 12 mm y 50 mm.

TIPO DE FUENTE SONORA	Separador 12 mm	Separador 50 mm
MONOPOLAR	$>13,2$ mm	>55 mm
DIPOLAR	$>19,2$ mm	>80 mm
CUADRIPOLAR	$>27,6$ mm	>115 mm

Observando la tabla 4.2 se puede aconsejar, que en general la separación entre la sonda de intensidad del tipo p-p y la fuente sonora, debe ser mayor de 200 mm para cualquier tipo de fuente.

4.2.8.- Resumen de los requisitos para la validación de las medidas de intensidad en función de la frecuencia

En los apartados anteriores se han descrito los posibles errores sistemáticos en la medida de la intensidad sonora. Estos errores cometidos al medir la intensidad sonora con sondas del tipo p-p, pueden eliminarse utilizando los espaciadores o separadores de micrófonos adecuados para el rango de frecuencias objeto de la

medida. No obstante, la precisión de la medida está condicionada a aspectos propios del campo sonoro, como es el grado de reactividad del campo, que es cuantificado con la ayuda del índice de reactividad. Además, se tiene que tener en cuenta en todo momento el desfase entre canales propio del equipo de medida.

Por otra parte, también la pericia del analista es importante, ya que tiene que definir la distancia de medida entre la superficie de la fuente y la sonda, que debe ser de unos 200 mm aproximadamente. Por otra parte, tiene que mantener la perpendicularidad de la sonda con respecto a la superficie definida y desplazarla a velocidad constante.

En la figura 4.16 se muestran todos los aspectos que condicionan la precisión de la medida (± 1 dB), pudiéndose seleccionar el tipo de espaciador para cada caso particular.

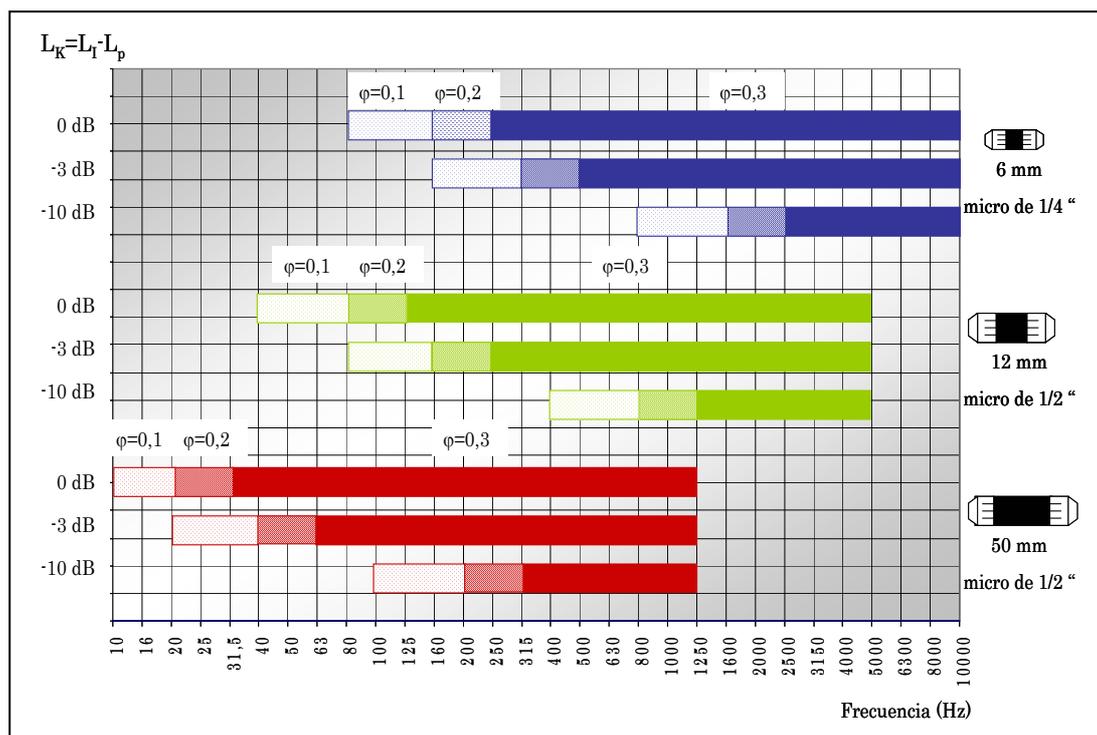


Figura 4.16. Distintos rangos de uso en frecuencia dependiendo del espaciador, ángulo de desajuste de fase ϕ y del índice de reactividad L_K para una precisión de la medida de ± 1 dB.

Finalmente, la medida tendrá un límite infranqueable a baja frecuencia que está condicionado por el punto de corte entre las curvas que definen el índice de reactividad y el índice de intensidad residual incrementado, figura 4.12. Apréciense en la figura 4.16, que el aumento del espaciado de los micrófonos incrementa el

rango de medida a baja frecuencia, mientras que a alta frecuencia disminuye. Igualmente, cuanto menor es el desajuste de fase, el rango de medida a baja frecuencia se incrementa.

4.2.9.- Error aleatorio

En las medidas de presión sonora se considera que el error aleatorio es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del producto del ancho de banda seleccionado B por el tiempo de promediado T . El intervalo de confianza considerado es del sesenta y ocho por ciento y se debe cumplir que, $B \cdot T \geq 10$.

$$\varepsilon_{\text{aleatorio}} (p_{\text{RMS}}^2) \cong \frac{1}{\sqrt{B \cdot T}}$$

Para medidas de intensidad sonora existe una formula equivalente,

$$\varepsilon_{\text{aleatorio}} (I) \cong \frac{1}{\sqrt{B \cdot T}} \sqrt{\left(1 + \frac{((1-\gamma^2)/2 \cdot \gamma^2)}{\text{sen}^2 \Phi}\right)}$$

Donde γ^2 es la función de coherencia entre las dos señales de los micrófonos. Existe una cierta dependencia del error aleatorio con respecto al índice de reactividad [30]. Para $K > 1$, el error aleatorio se puede calcular de forma aproximada por medio de la expresión (4.17). La relación, como se deduce de la ecuación, es lineal.

$$\varepsilon_{\text{aleatorio}} [I] \sqrt{B \cdot T} \approx 0,42 \left(\frac{p_{\text{RMS}}^2 / \rho c}{I} + 1 \right) \approx 0,42 (K + 1) \quad (4.17)$$

De la expresión anterior se deduce que el error aleatorio depende directamente del índice de reactividad o índice de presión-intensidad. Es decir, el ruido de fondo elevado que es la principal causa de un alto índice de reactividad en la medida de la intensidad sonora, va a ser el factor más importante en la determinación de este tipo de error.

Finalmente, indicar que también podrían considerarse como errores aleatorios los que se derivan de: una orientación no perpendicular de la sonda respecto de la superficie de medida, una velocidad de barrido no uniforme, el ruido eléctrico de la instrumentación, etc.

4.3.-Precisión en la medida de la intensidad sonora por el método de barrido

La intensidad sonora se determina multiplicando el vector de la velocidad de las partículas del aire por un escalar obtenido como promedio de la medida de la presión sonora de los dos micrófonos de la sonda. La intensidad, como parámetro necesario para calcular la potencia acústica, está definida ampliamente en la serie de normas UNE EN ISO 9614. Donde se establecen dos procedimientos de medida distintos: *Medida por puntos discretos* (UNE EN ISO 9614-1) y *Medida por barrido* (UNE EN ISO 9614-2). El procedimiento de medida por puntos discretos resulta muy laborioso debido a que es necesario un gran número de registros de intensidad para cada superficie de medida [77], por el contrario, se obtiene una buena precisión en los resultados finales. Como alternativa al método por puntos se puede utilizar el método por barrido, que resulta algo más impreciso pero más fácil y rápido de utilizar [78].

Los niveles de intensidad y presión sonora en un punto del espacio dependen principalmente de dos aspectos, que son: las características del entorno acústico donde se realiza la medida y del método de medida empleado. En la presente tesis se ha utilizado el procedimiento de medida por barrido, teniéndose en cuenta los aspectos relacionados con la precisión de la medida que son establecidos en la norma UNE EN ISO 9614-3 *“Método de precisión para la medición por barrido”*. La precisión de las medidas se basa en establecer unos indicadores de campo específicos que se deben cumplir para validar los resultados [79].

4.3.1.- Incertidumbre en la medida de la intensidad sonora

Para determinar la intensidad sonora radiada por una fuente acústica se debe cumplir el requisito básico de que ésta sea estacionaria en el tiempo. Si su funcionamiento es cíclico, debe promediarse en el tiempo las fluctuaciones de nivel sonoro contemplando varios ciclos de funcionamiento. Puede ser interesante incluso para fuentes cíclicas, descomponer en un ciclo de funcionamiento la emisión de la energía sonora. No obstante, la mayoría de las fuentes en estudio de carácter industrial generan campos sonoros que pueden ser considerados estacionarios en el tiempo. Otro aspecto que puede hacer no estacionario el ruido generado por una fuente sonora, es la presencia de otras fuentes externas fluctuantes. La medida de la

intensidad sonora se utiliza habitualmente para determinar la potencia acústica radiada por el foco generador del campo sonoro, cuyo valor es igual a la integral del producto entre el vector de la intensidad sonora y el vector unitario asociado a la superficie que envuelve totalmente a la fuente. Teniendo en cuenta el signo de la intensidad sonora, que determina la dirección en la que se desplaza el flujo de energía, se puede dar la circunstancia de que entre energía a la superficie de medida y no salga al ser absorbida en el interior de ésta. La intensidad sonora total absorbida en el interior de la superficie que envuelve a la fuente, contribuirá negativamente en el cálculo de la potencia acústica, ya que generará un diferencial entre la energía que entra y la que sale, figura 4.17. Por ello debe evitarse al máximo la incidencia de focos externos en la proximidad de la fuente objeto de ensayo.

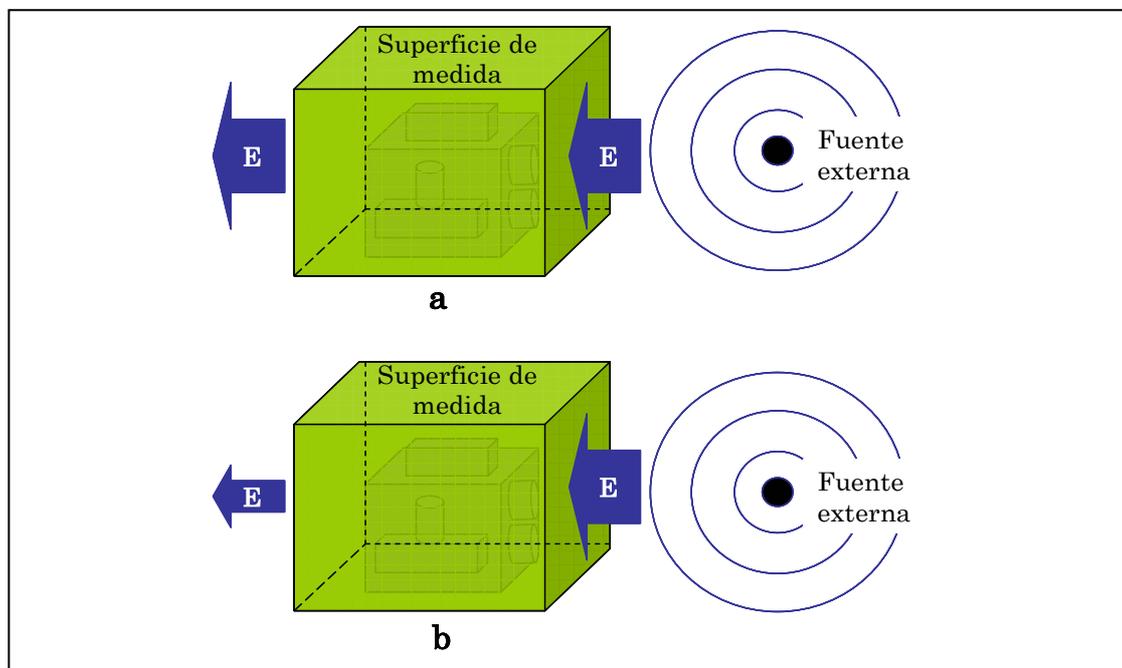


Figura 4.17. (a) El flujo de energía procedente de la fuente externa atraviesa íntegramente la superficie de medida, no produciéndose error en la medida. (b) La energía entrante es absorbida parcialmente en el interior de la fuente objeto de ensayo, produciéndose un error en la medida.

Con la finalidad de minimizar el error relacionado con la absorción, se debe también retirar cualquier material que absorba el sonido situado en el interior de la superficie de medida, salvo que normalmente esté presente durante el funcionamiento de la fuente.

El procedimiento de medida de la intensidad sonora por el método de barrido, se basa en mover perpendicularmente a la superficie de medida la sonda de intensidad según una trayectoria predefinida. Este muestreo espacial es función de

la variación de la componente de la intensidad normal procedente de la superficie barrida, que depende de: las características de directividad de la fuente, la superficie de medida escogida, la distancia desde la superficie de barrido hasta la fuente, la velocidad de barrido y de la proximidad de fuentes externas fuera de la superficie de medida. El nivel de intensidad sonora medido por cualquier procedimiento difiere con seguridad del valor real. La diferencia entre el valor real y el medido no puede ser evaluada con exactitud, pero si se puede establecer con certeza, que los valores medidos estarán en un rango de desviación para un grado de confianza y precisión determinada.

Cuando se realizan las medidas sobre una fuente colocada en su lugar de ensayo, en condiciones semejantes, utilizando el mismo procedimiento y la misma instrumentación, los valores de intensidad obtenidos son un conjunto de datos que permiten obtener el error de repetibilidad de las medidas desde un punto de vista estadístico. Dicho error está relacionado exclusivamente con la calidad de los controles de los procesos de fabricación de las fuentes, generalmente máquinas, así como de los procedimientos de medida y los medios humanos y materiales de los que se dispone para medir.

Si las medidas sobre la fuente se realizan en un lugar distinto, con el mismo procedimiento y con instrumentación y personas diferentes, los valores de intensidad obtenidos de esta manera son un conjunto de datos que describen estadísticamente el error de reproducibilidad de las medidas. El error de reproducibilidad se produce por las diferentes características físicas y ambientales de los entornos de ensayo, la pericia diferente de las personas que aplican los procedimientos de medida y las condiciones de calibración de los equipos de medida concretos. Pero excluye las variaciones que puedan acontecer por las condiciones de funcionamiento de la fuente objeto de estudio. Apréciase, que los errores de repetibilidad están incluidos en el error de reproducibilidad.

Los valores máximos estimados de las desviaciones típicas de reproducibilidad en la medida de la intensidad sonora por el procedimiento de barrido se muestran en la tabla 4.3. A menos de que se posea un estudio pormenorizado de la incertidumbre de las medidas, los valores que la delimitan serán considerados como el doble de las desviaciones típicas de reproducibilidad de la tabla 4.3, para un margen de confianza del 95%.

Tabla 4.3. Valores máximos de las desviaciones típicas de reproducibilidad según UNE EN ISO 9614-3

<i>Frecuencias centrales en bandas de tercio de octava</i> Hz	<i>Valores máximos de la desviación típica de reproducibilidad</i> dB
50 a 160	2.0
200 a 315	1.5
400 a 5000	1.0
6300	2.0

Por debajo de los 50 Hz no existen datos de reproducibilidad, debido sobre todo a los problemas de imprecisión en la medida de la fase de la onda sonora por parte de los micrófonos de la sonda. Igualmente, por encima de los 5 kHz comienzan a producirse errores de medida por los efectos turbulentos que se generan en el entorno de los micrófonos. Existen estudios mencionados en el capítulo anterior, que justifican que es posible llegar hasta los 10 kHz, debido a que los errores que se cometen pueden compensarse [43], pero siempre y cuando se utilicen micrófonos enfrentados y con un separador de 12 mm.

Para garantizar la precisión de las medidas es necesario definir una serie de indicadores de campo auxiliares que aporten información sobre la calidad de las medidas, así como las modificaciones a realizar en el procedimiento para validar los resultados obtenidos con suficiente precisión.

4.3.2.- Caracterización del entorno acústico

El entorno de ensayo debe permitir la medida de la intensidad sonora radiada por la fuente, evitando las contribuciones de fuentes de ruido externas, campos excesivamente reactivos y la presencia de flujos de aire o gases a velocidades superiores a 1 m/s.

El nivel de intensidad debida a fuentes externas debe minimizarse, o al menos intentar que el nivel de potencia acústica radiada sea 10 dB inferior al de la fuente en estudio. Debe evitarse también la variabilidad del nivel de intensidad durante el periodo de medición. Para llevar a cabo este propósito, se puede

seleccionar adecuadamente los periodos de medida en aquellos momentos donde la variabilidad sea nula. En el supuesto de que no fuera posible cumplir la condición anterior, se debe desconectar todas las fuentes externas que no sean esenciales para el funcionamiento de la fuente en estudio. La configuración de la zona de ensayo tiene que permanecer inalterada durante la realización de las medidas con la única excepción de la persona que maneja la sonda de intensidad. Es imprescindible dejar libre el entorno definido por el eje central de la sonda, de tal forma que el operador no se sitúe ni entre la fuente y la sonda, ni detrás de ésta.

Las condiciones atmosféricas, tanto de humedad como de temperatura, deben ser consideradas en el proceso de calibración de la sonda, ya que afectan a la densidad del aire y, consecuentemente, varía la velocidad de propagación del sonido. La temperatura también debe tenerse en cuenta cuando ésta sea elevada en la zona definida por la superficie de medida, como consecuencia del funcionamiento normal de la fuente o por otras razones. La exposición de la sonda a variaciones de temperatura a lo largo de su eje puede introducir errores de medida en los micrófonos, estimándose de forma incorrecta la intensidad sonora.

4.4.- Indicadores de campo y metodología de la medida del nivel de intensidad sonora

El principio básico para la determinación de la potencia acústica de una fuente consiste en medir la componente normal de la intensidad sonora. Es decir, la componente perpendicular a la superficie de medida definida previamente en torno a la fuente sometida a ensayo. Los principales aspectos que motivan la incertidumbre de los resultados están asociados con la instrumentación de medida, principalmente debido al desfase en la adquisición de las señales de los micrófonos, su procesado posterior y la realización de un muestreo espacial o barrido no ideal. Todo lo relacionado con la cadena de medida solo puede subsanarse utilizando equipos tecnológicamente avanzados, cuyo inconveniente más importante es el elevado coste de adquisición.

4.4.1- Determinación de la superficie de medida

El proceso de muestreo está condicionado por la pericia del operador de la sonda. Por ello, lo más importante es definir una superficie de “fácil” barrido,

fundamentalmente subdividida en superficies parciales donde las líneas que definen la trayectoria de la sonda sean lo más rectas posible. Esta condición permite que la orientación perpendicular de la sonda con respecto a la superficie se mantenga fácilmente durante el proceso de medida. Además, es posible obtener una velocidad de desplazamiento más o menos constante y una densidad de línea uniforme. Tan solo en los giros puede introducirse un error de promediado que sobreestime la contribución del borde de la superficie, sobre todo si se realiza manualmente el proceso de barrido. Como criterio general se debe mantener la misma atención en el trazado a seguir con la sonda en el proceso de barrido y su perpendicularidad respecto de la superficie, que en mantener la velocidad de avance constante y la uniformidad en la densidad de las líneas de cada barrido. Una concentración excesiva en cualquiera de las tareas indicadas puede afectar sensiblemente a la precisión de la medida. Resulta especialmente conveniente que el operador encargado de realizar los barridos sea adiestrado en el procedimiento, de forma que sea capaz de mantener dentro de los márgenes admisibles las condiciones de perpendicularidad, avance y uniformidad, mencionadas anteriormente.

En la figura 4.18 se muestra como pueden ser definidas las superficies de medida de cada una de las caras del paralelepípedo, donde es virtualmente encerrada la fuente sonora.

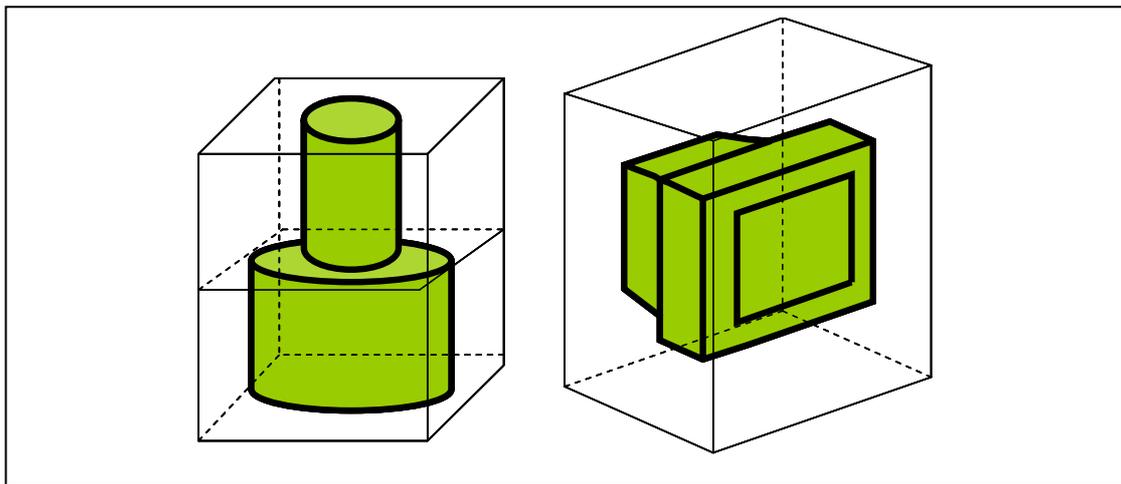


Figura 4.18. Ejemplos de determinación de las superficies de medida en torno a las fuentes.

La realización de los barridos en superficies rectas como las de la figura 4.18, es primordial para mantener: la trayectoria, la perpendicularidad de la sonda, la densidad de las líneas de barrido y la velocidad de avance, por parte del operador.

4.4.2- Determinación de las trayectorias de barrido

El elemento básico de una trayectoria de barrido es una línea recta. Por lo tanto, un barrido sobre una superficie es un conjunto de líneas rectas. La cantidad de éstas, comprendidas en la totalidad de la superficie, define la densidad de barrido, que es un factor decisivo en el grado de precisión de la medida.

Un procedimiento mecanizado para la realización del barrido, mejora la precisión de las medidas al eliminar las variaciones debidas al operador en un proceso manual. No obstante, hay que tener en cuenta que el sistema de desplazamiento automático de la sonda no se convierta en una fuente externa de ruido. La intensidad sonora generada por este mecanismo debe ser al menos 20 dB inferior al emitido por la fuente sometida a ensayo.

Antes de determinar la trayectoria de barrido es necesario dividir la superficie parcial en segmentos. Además, se pueden emplear una o las dos trayectorias ortogonales definidas en la figura 4.19.

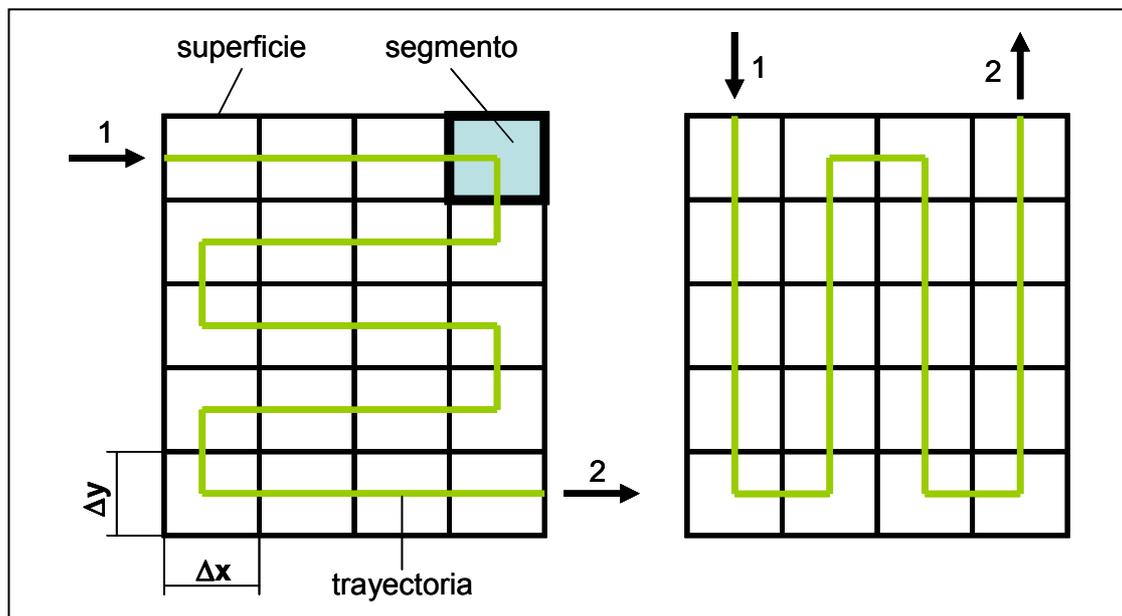


Figura 4.19. Ejemplos de trayectorias ortogonales de barrido de una superficie parcial de medida.

La relación entre los lados de cada segmento debe cumplir la condición siguiente:

$$0,83 \leq \frac{\Delta x}{\Delta y} \leq 1,2$$

Además, el lado mayor de segmento debe ser inferior a la mitad de la distancia mínima entre la superficie parcial de medida y la fuente sometida a ensayo. Otra condición que se tiene que cumplir es que para todas las superficies parciales, es decir para la totalidad de la superficie de medida, la relación entre las áreas del segmento mayor y el menor debe ser de 3/2 como máximo. Las trayectorias de barrido se inician, según la figura 4.19, por la flecha marcada con el número uno y se acaba por la marcada con el número dos, pudiéndose invertir el orden si se considera necesario. También se puede curvar ligeramente la trayectoria en las esquinas, facilitándose el giro, y sobre todo, mantener la velocidad lo más constante posible.

4.4.3- Determinación del tiempo de barrido

En primer lugar es necesario definir una trayectoria de barrido de las dos representadas en la figura 4.19 para cada superficie parcial, ejecutándose ésta, dos veces por cada medida. La duración de cada barrido depende de la variabilidad del campo sonoro en el tiempo y se determina con antelación a la realización de las medidas. El ensayo de la variabilidad temporal del campo sonoro se utiliza para determinar el tiempo de barrido idóneo. Se escoge una posición de medida apropiada con un alto nivel de intensidad, estimándose si el campo sonoro es estacionario por medio de una serie de medidas de intensidad sonora.

En cada serie se registran durante un intervalo de tiempo T superior a 100 segundos, los valores de intensidad sonora instantánea I_{nq} y de presión sonora P_q , determinándose también la intensidad sonora promedio I_{nm} , así como la presión sonora promedio P_m de cada una de las series. Para obtener los valores promedio de intensidad y presión sonora cuadrática no es necesario que sean consecutivos.

La cuantificación de la variabilidad del campo sonoro se obtiene por medio del indicador de variabilidad temporal F_T para varios valores de T con un incremento de 0,5 segundos. Dicho indicador se define por la ecuación (4.18), donde I_n es el valor de la intensidad sonora promediada de todas las series de medida a partir de la intensidad sonora promedio de cada serie, según la ecuación (4.19). Normalmente, el número de series de medida M será igual o mayor a diez.

$$F_T = \frac{1}{I_n} \cdot \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (\bar{I}_{nm} - \bar{I}_n)^2} \quad (4.18)$$

$$\bar{I}_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \bar{I}_{nm} \quad (4.19)$$

En la figura 4.20 se muestra gráficamente los datos utilizados para obtener el indicador de variabilidad temporal F_T .

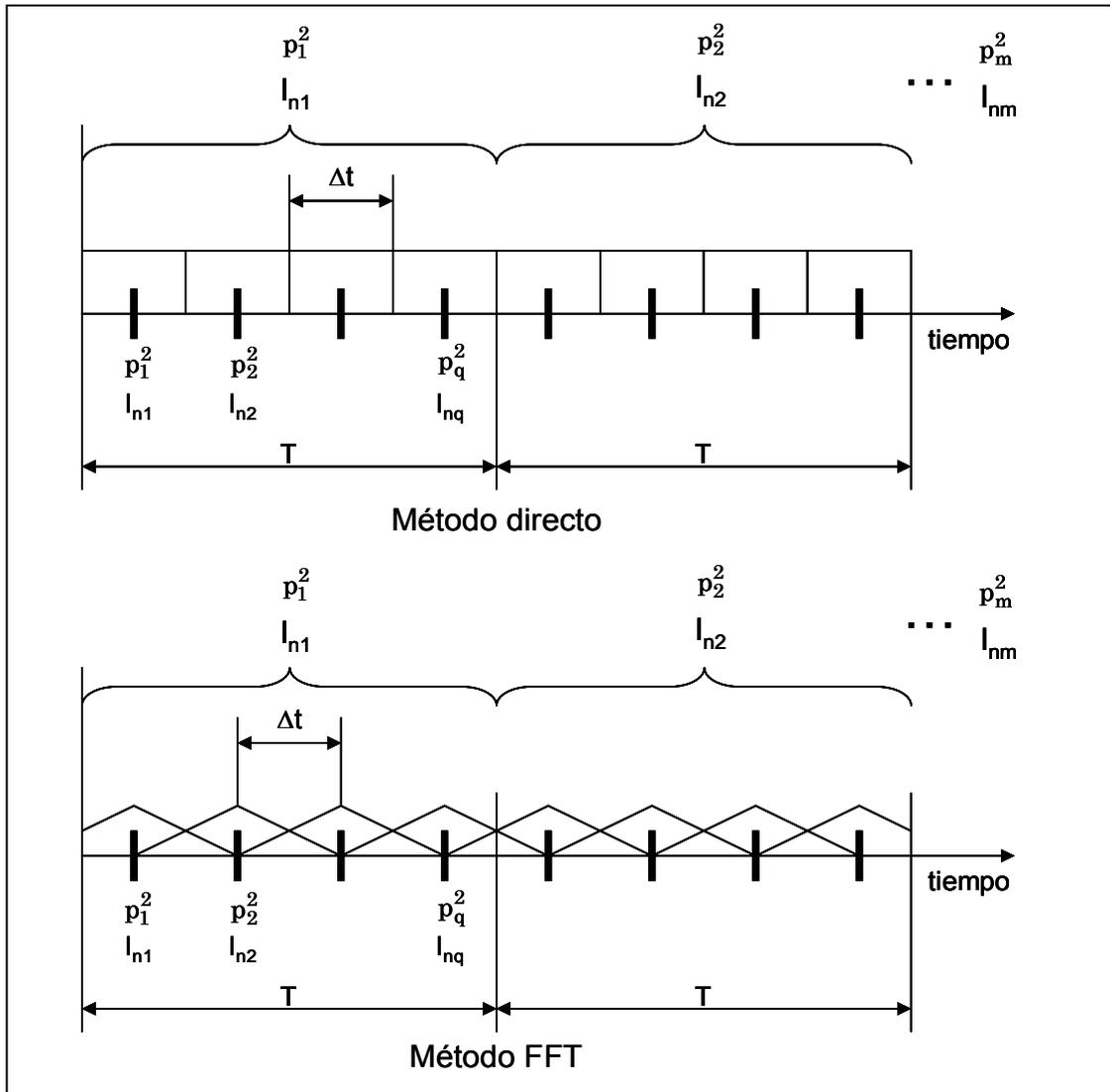


Figura 4.20. Distintos métodos de muestreo para obtener el indicador de variabilidad temporal.

Al ir variando el periodo de promediado T , se obtiene un tiempo que cumple la condición de $F_T < 0,6$. Este valor del indicador de variabilidad temporal se utilizará para determinar el tiempo de barrido T_s para una superficie parcial mediante la expresión (4.20). Donde N_s es el número de segmentos comprendidos en la superficie parcial.

$$T_s \geq N_s \cdot T_{F_T < 0,6} \quad (4.20)$$

El método FFT o método indirecto utiliza el espectro cruzado de las dos señales de los micrófonos. La medida debe realizarse con una ventana Hanning y con un solapado de al menos el 30%.

4.4.4-Comprobación de la repetibilidad del barrido en una superficie parcial

Se realizan dos barridos independientes para la misma trayectoria elegida. La duración debe ser lo más próxima posible al tiempo de barrido T_s , que se determina según el procedimiento descrito en el párrafo anterior. Se consideran desviaciones aceptables si el tiempo de barrido real T_s' es $\pm 20\%$ del tiempo teórico T_s . De no cumplirse esta condición se descartan las medidas y se repite cuantas veces sea necesario. Este requisito se cumple fácilmente cuando el operador que realiza la medida tiene experiencia probada en esta técnica.

Para cada barrido se obtienen dos valores de intensidad que se definen numéricamente según el orden en el que se han medido I_{n1} y I_{n2} . Para cada barrido se determinan los niveles de intensidad sonora promediados en el tiempo de barrido T_s' . La diferencia entre ambos niveles de intensidad sonora promediada debe cumplir la condición (4.21). Es decir, que la diferencia entre intensidades en términos absolutos debe ser menor que la mitad de la desviación típica definida en la tabla 4.3 en todas las bandas de frecuencia.

$$|\bar{L}_{In1} - \bar{L}_{In2}| \leq \frac{s}{2} \quad (4.21)$$

Si este criterio se cumple al comparar los dos barridos, se registran para cada superficie parcial los niveles de intensidad normales promediados para todas las bandas de frecuencia de medida. Obteniéndose un espectro único de intensidad sonora a partir de los valores medidos en cada barrido, según la ecuación (4.22).

$$\bar{L}_{In} = 10 \log \left[\frac{1}{2} \left(10^{\bar{L}_{In1}/10} + 10^{\bar{L}_{In2}/10} \right) \right] \quad (4.22)$$

Así mismo, se obtienen las intensidades sonoras promediadas en el tiempo y las presiones sonoras cuadráticas para cada uno de los segmentos definidos en cada superficie parcial. Estas medidas se utilizan para calcular el indicador de no uniformidad espacial del campo sonoro F_s , según la expresión (4.23).

$$F_s = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\bar{I}_{nj} - \bar{I}_n)^2} \quad (4.23)$$

Donde,

\bar{I}_{nj} , representa la intensidad sonora promediada temporalmente en cada segmento de una superficie parcial

\bar{I}_n , es la intensidad sonora promediada temporal y espacialmente para todos los segmentos de una superficie parcial, obtenida según la expresión (4.24)

$$\bar{I}_n = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{I}_{nj} \quad (4.24)$$

Calculado el indicador de no uniformidad espacial del campo sonoro este debe cumplir la condición $F_s \leq 2$, en cada banda de frecuencia medida. De no ser así, se debe incrementar la densidad de barrido aumentando el número de segmentos en la superficie parcial en un factor de 2 o mayor. Comparando el indicador de campo actual F_{s1} y el anterior F_{s2} , su relación debe estar comprendida para cada banda de frecuencia en el intervalo que delimita la siguiente condición, $0,83 \leq F_{s1}/F_{s2} \leq 1,2$. Aunque en el resultado final $F_s \geq 2$.

4.4.5- Comprobación del índice presión-intensidad

Este índice define el grado de reactividad del campo sonoro como ya se mencionó anteriormente. Dependiendo de la calidad del equipo de medida utilizado, el índice presión-intensidad puede limitar la precisión de la medida frente a la frecuencia. Es decir, el ancho de banda donde se puede considerar adecuada la precisión de la medida se puede ver limitado al utilizar un equipo que introduce un elevado desfase en la medida de los dos canales de micrófono ante un campo sonoro muy reactivo. El índice presión-intensidad o índice de reactividad L_K o indicador presión-intensidad F_{p/I_n} , según lo denomina la norma UNE EN ISO 9614-3, viene dado por la expresión (4.25).

$$F_{p/I_n} = \bar{L}_p - \bar{L}_{|I_n|} \quad (4.25)$$

Siendo \bar{L}_p , el nivel de presión sonora promediado temporal y espacialmente, obtenido según la expresión (4.26).

$$\bar{L}_p = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\bar{p}_j^2}{P_0^2} \right) \quad (4.26)$$

Donde,

\bar{p}_j^2 , es la presión cuadrática promediada en el tiempo de medida en cada segmento

P_0 , es la presión sonora de referencia (20 μ Pa)

N , es el número de segmentos para una superficie parcial

Por otra parte, $\bar{L}_{|In|}$ es el valor absoluto del nivel de intensidad sonora normal promediada temporal y espacialmente, que se define según la expresión (4.27).

$$\bar{L}_{|In|} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\bar{|I}_{n|j}}{I_0} \right) \quad (4.27)$$

Donde,

$\bar{|I}_{n|j}$, es la intensidad sonora promediada en el tiempo de medida en cada segmento

I_0 , es la intensidad sonora de referencia (10^{-12} w)

N , es el número de segmentos para una superficie parcial

Se debe cumplir la condición de que la capacidad dinámica del equipo de medida debe ser mayor o igual que el indicador presión-intensidad, $L_d \geq F_{p|In|}$.

Recuérdese, que la capacidad dinámica representa la diferencia entre el nivel de presión y el nivel de intensidad sonora medidos cuando se aplica la misma señal a los dos micrófonos de la sonda más un valor añadido que depende del grado de precisión, véase la figura 4.12.

4.4.6- Comprobación de la presencia de fuentes externas

La reactividad de un campo sonoro está relacionada con la presencia de fuentes externas que aportan una elevada energía acústica en el entorno, o bien, debido a un campo reactivo motivado por el recinto de ensayo que resulta excesivamente reverberante. Para valorar la incidencia en la precisión de las medidas de fuentes externas significativas, se determina la diferencia entre el indicador presión-intensidad en valor absoluto $F_{p/In}$ y el mismo indicador con su signo F_{pIn} . La diferencia entre ambos valores para cada banda de frecuencia debe ser, $F_{pIn} - F_{p|In}| \leq 3$.

4.5.- Procedimiento de medida general y de optimización de la precisión de las medidas de intensidad sonora

En los apartados anteriores se han definido los distintos indicadores de campo para valorar la precisión de las medidas de intensidad y de potencia acústica originados por fuentes sonoras. Igualmente se han expuesto los criterios con los que se tiene que valorar los indicadores.

Generalmente si se evalúan los distintos requisitos con suficiente rigor, las medidas tendrán una precisión de $\pm 0,5$ dB. Cuando no se cumpla alguno de los criterios indicados será necesario modificar las condiciones en las que se están realizando las medidas por parte del operador.

Por lo tanto, las medidas deben cumplir las condiciones especificadas en los apartados anteriores. Los indicadores de campo se utilizarán para comprobar el cumplimiento de los criterios que garantizan la precisión. La secuencia de medida es la siguiente:

- 1º.- Determinar el tiempo de barrido teórico T_s a partir del cálculo del tiempo que verifica que el indicador de variabilidad de campo F_T tiene un valor de 0,6 o inferior.
- 2º.- Definir la superficie de medida total y las superficies parciales que rodean la fuente sonora. Las superficies parciales se definen de forma que sea posible materializar la trayectoria de barrido elegida en el tiempo calculado T_s .

- 3°.- El primer criterio que se debe verificar es el de la repetibilidad de la medida en cada superficie parcial. Denominado como criterio 1, es el definido por la expresión (4.21).
- 4°.- El segundo criterio verifica la calidad de la instrumentación utilizada para medir en condiciones de campo sonoro muy reactivo, $L_d \geq F_{p/In}$. Por una parte, el indicador presión-intensidad $F_{p/In}$ define la reactividad del campo, y por otra parte, la capacidad dinámica L_d está relacionada con la calidad del equipo en cuanto a la simultaneidad de medida de los dos canales.
- 5°.- El tercer criterio permite valorar la incidencia de fuentes externas que pueden perturbar la medida e impedir su validación con el grado de precisión deseado, $F_{pIn} - F_{p/In} \leq 3$.
- 6°.- Con el cuarto criterio se verifica la uniformidad del campo sonoro. Para ello, se utiliza el indicador de no uniformidad espacial del campo sonoro F_s , según la expresión (4.23).
- 7°.- El quinto criterio se utiliza cuando es necesario incrementar la densidad de barrido por incumplimiento de alguno de los cuatro criterios anteriores. La condición a cumplir es la que se indica a continuación,

$$0,83 \leq F_{s1}/F_{s2} \leq 1,2.$$

- 8°.- Si es posible cumplir los cuatro primeros criterios la medida es aceptada como válida para el mayor grado de precisión, es decir $\pm 0,5$ dB. Si se cumplen las tres primeras condiciones y la quinta, se considera la máxima precisión también.

En el caso de no verificarse alguno de los cinco criterios, es necesario adoptar medidas relacionadas directa o indirectamente con el tiempo de barrido T_s , como son: la definición de las superficies parciales, la velocidad de avance de la sonda, el tipo de trayectoria, la densidad de barrido y además, la distancia de la superficie de medida a la fuente [79].

El procedimiento de medida secuencial que se ha expuesto, se puede representar gráficamente como se muestra en la figura 4.21.

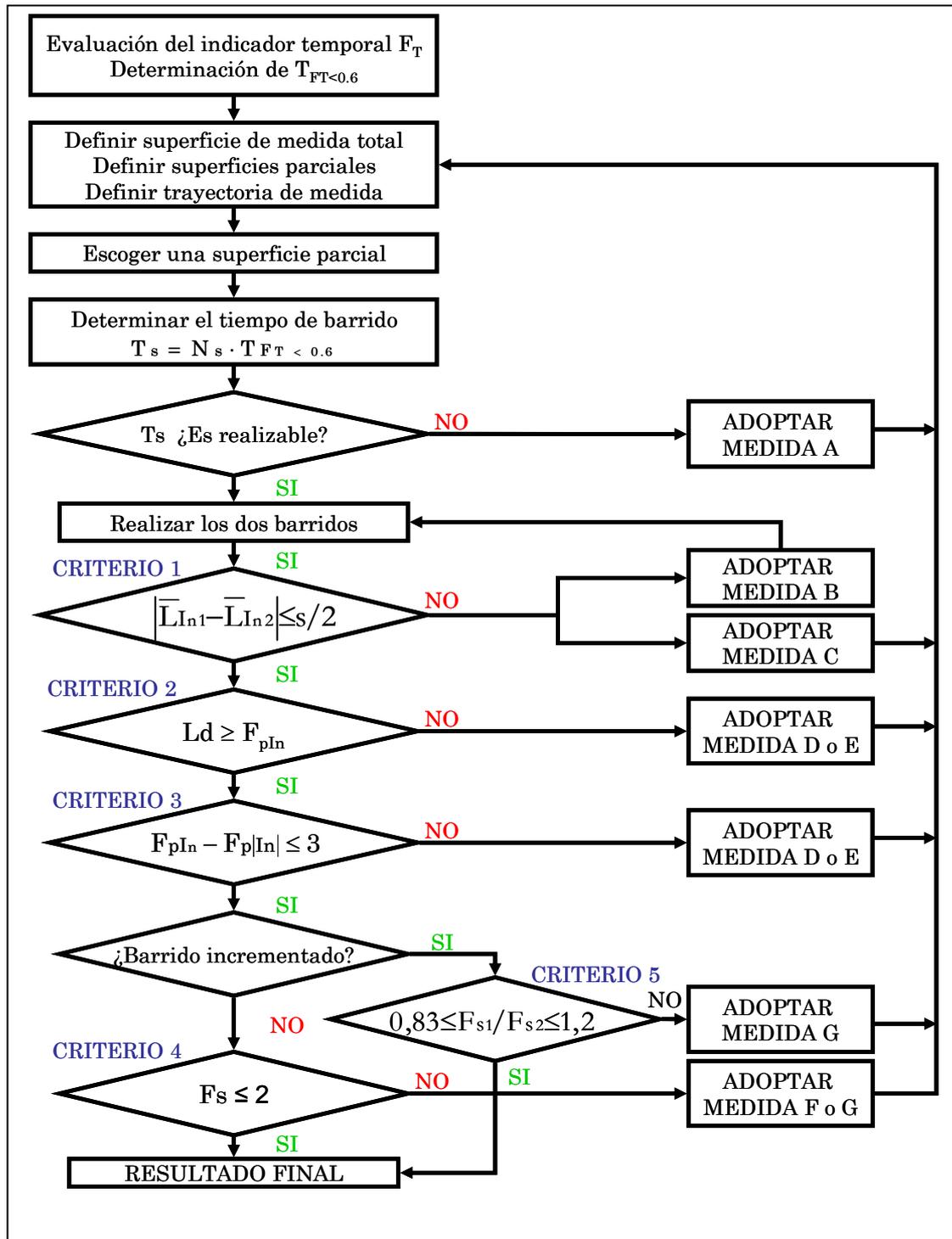


Figura 4.21. Esquema secuencial para optimizar la precisión de la medida de la intensidad sonora.

Las medidas a adoptar, si no se cumple alguno de los criterios, han sido clasificadas en el esquema como: A, B, C, D, E, F y G. El significado específico de cada una de estas claves se define con detalle en la tabla 4.4. Si tomadas las acciones que se indican en dicha tabla, se sigue sin cumplir alguno de los criterios, se considerará inviable el máximo grado de precisión.

Tabla 4.4. Acciones a adoptar para incrementar la precisión en la medida de la intensidad.

CONDICIÓN	CLAVE	MEDIDA
Tiempo de barrido (T_s) no factible.	A	Se debe incrementar el tiempo de barrido, y/o reducir la variabilidad temporal de la intensidad de fuentes exteriores o medir durante los instantes donde tenga lugar la menor variabilidad.
<u>CRITERIO 1</u> $ \bar{L}_{In1} - \bar{L}_{In2} \leq \frac{s}{2}$	B y/o C	Modificar la velocidad de barrido, el tiempo de barrido y/o la trayectoria. Modificar las superficies parciales y/o las superficies de medida.
<u>CRITERIO 2</u> $L_d < F_{pIn}$	D o E	Si el ruido externo es significativo y/o existe una elevada reverberación, es necesario reducir la distancia promedio de la superficie de medida de la fuente a un valor mínimo promedio de 250 mm. En el caso de no estar en presencia de un campo reactivo aumentar la distancia hasta un máximo de 1 m. Proteger la fuente sonora en estudio de los factores que generan el campo reactivo.
<u>CRITERIO 3</u> $F_{pIn} - F_{p In} > 3$	D o E	Las medidas son las mismas que las adoptadas con el criterio 2.
<u>CRITERIO 4</u> $F_s > 2$	F o G	Se debe incrementar la distancia promedio de la superficie parcial a la fuente. Se debe incrementar la densidad de barrido, como criterio general se debe doblar el número de líneas.
<u>CRITERIO 5</u> $0,83 \leq F_{s1}/F_{s2} \leq 1,2$	G	Se debe incrementar la densidad de barrido.

Como ya se ha mencionado, si no se consigue verificar el cumplimiento de los criterios que definen el máximo grado de precisión $\pm 0,5$ dB, las medidas se pueden aceptar con un grado de precisión de control o peritaje ± 1 dB.

Capítulo 5

RECURSOS MATERIALES Y TÉCNICOS. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO.

5.1.- Introducción

Como ya se expuso en el capítulo 1, el objetivo principal de la presente tesis es establecer un procedimiento de ensayo alternativo al establecido en la norma UNE EN ISO 140-3 *“Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Medición en laboratorio del aislamiento acústico al sonido aéreo de los elementos de construcción”*. La norma UNE EN ISO 140-3 permite determinar el Índice de Reducción Sonora (R) de diversos materiales con propiedades aislantes frente al ruido. Por otra parte, la validación de las medidas de intensidad sonora se ha llevado a cabo cumpliendo los requisitos establecidos en la norma UNE EN ISO 9614-3 *“Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la intensidad sonora. Método de precisión para la medición por barrido”*.

Además se ha realizado un modelo teórico utilizando un software comercial basado en los fundamentos del Análisis Estadístico de Energía (SEA), permitiendo comparar los resultados teóricos con los obtenidos de forma experimental sobre una probeta de acero. Por último, se han aplicado técnicas de análisis modal combinadas con la medida de intensidad sonora sobre dicha probeta. En los siguientes apartados de este capítulo se describe con detalle los medios materiales y técnicos utilizados, así como los procedimientos de medida empleados.

5.2.- Recursos materiales

Los recursos materiales utilizados, estrictamente hablando, han sido una estructura de acero en forma de paralelepípedo donde se ha introducido una fuente sonora comercial y sobre la que se ha montado las distintas probetas de ensayo. A estos medios habría que añadirle el equipamiento empleado, que se define más adelante con el epígrafe de medios técnicos, y el recinto donde se han realizado las medidas. Las dimensiones del recinto y la disposición de la fuente sonora se muestran en la figura 5.1.

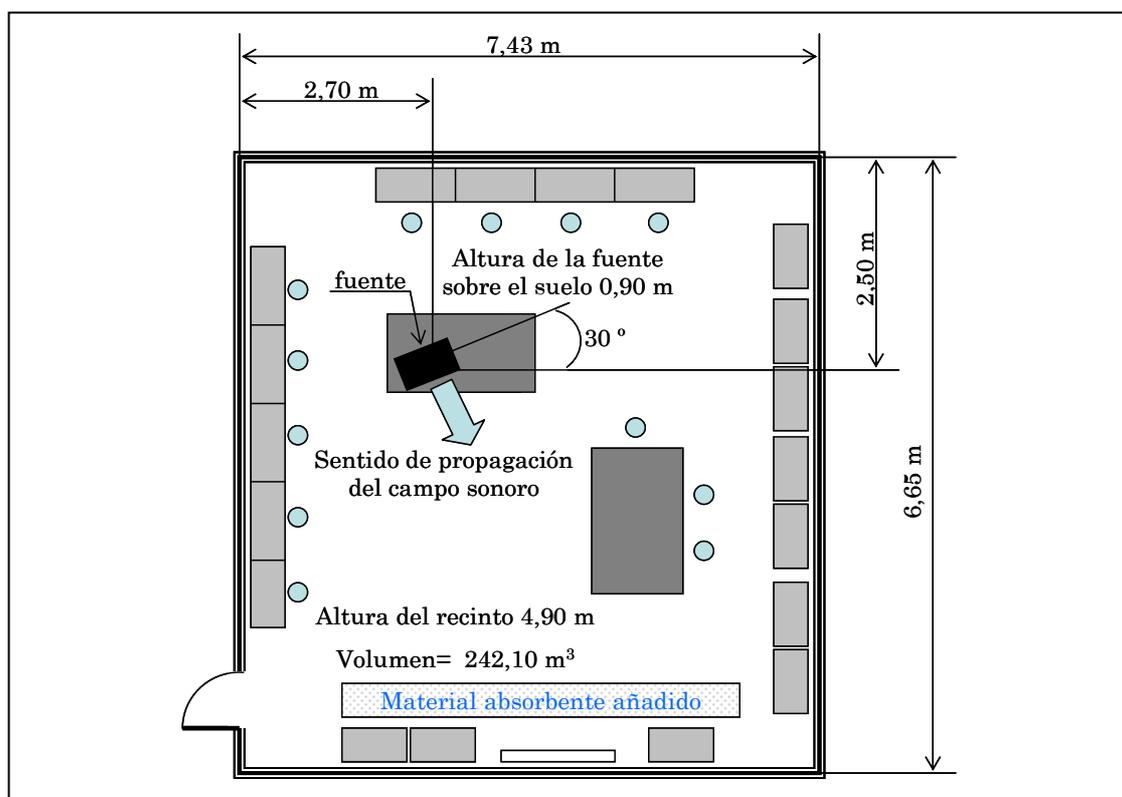


Figura 5.1.- Dimensiones de la sala de ensayo y disposición de la fuente sonora en el recinto.

Para mejorar el comportamiento de la sala y evitar la creación de un campo sonoro excesivamente reactivo, se ha colocado material absorbente en la pared que recibe el flujo de energía sonora de forma directa.

5.2.1.-Estructura para la realización de los ensayos

Para la realización de las medidas se ha construido una caja, donde poder ubicar la fuente sonora en su interior y montar probetas de distintos tipos de

material en una de sus caras. La caja ha sido fabricada con placas de chapa de acero de 6 milímetros de espesor atornilladas a una estructura soldada de perfiles angulares de acero de 40 x 40 x 4 milímetros. Todas las caras interiores de la caja han sido forradas con un material aislante de poliuretano base poliéster, excepto una de ellas que es donde se han montado las distintas probetas de ensayo.

El volumen interior se corresponde con el volumen físico de una fuente sonora unidireccional, que ha sido introducida en el interior de la caja para generar un campo sonoro directo sobre las probetas. En la figura 5.2 se muestra la composición de la estructura y la zona de ubicación de los materiales a ensayar.

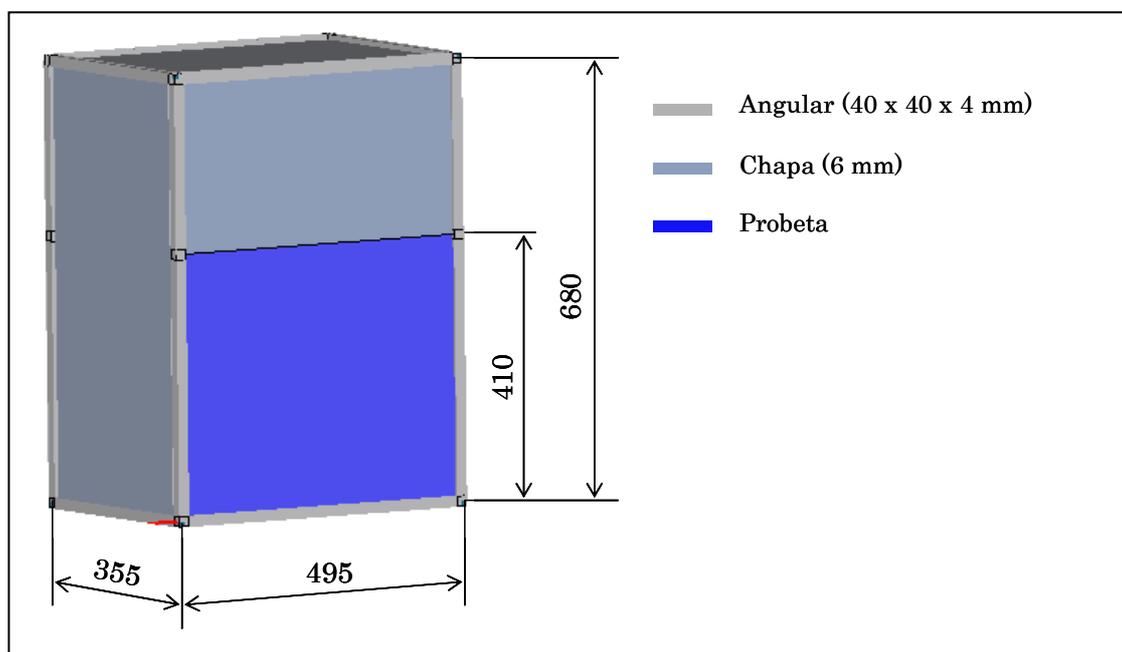


Figura 5.2.- Dimensiones principales de la caja de acero que interiormente ha sido forrada de material aislante. El área de color azul cielo es la zona donde se colocan las probetas objeto de ensayo.

Como ya se ha comentado, las superficies interiores de la caja se han forrado con un material aislante de espuma de poliuretano base poliéster a la que se ha incorporado un aditivo retardador de la llama durante su proceso de fabricación y una capa superficial de poliuretano en unas de sus caras. La otra cara del material es adhesiva para favorecer su colocación. Por otra parte, la estructura de las celdas es semicerrada, resultando el material impermeable frente a líquidos y permeable a los gases. Este tipo de producto se suele presentar comercialmente en planchas o en rollos y posee claramente mejores características absorbentes que aislantes, debido a su configuración en celdas.



Figura 5.3. - Material aislante utilizado en el forrado del interior de la caja de ensayo.

En la figura 5.3 se muestra el aspecto de dicho material, apréciase el carácter poroso. La parte superior más oscura es la capa de poliuretano, fácilmente lavable. Su densidad es de 25 Kg./m³ y su espesor de 40 milímetros. Su misión dentro de la estructura de ensayo es mejorar la capacidad aislante de la chapa de 6 milímetros a media y alta frecuencia.

5.2.2.-Materiales de las probetas ensayadas

La finalidad de la estructura de ensayo es ofrecer una gran impedancia a la propagación del sonido a través de todas sus superficies, excepto la correspondiente a la zona de ensayo o medida. Para ello, se ha decidido que las superficies sean de acero de 6 milímetros de espesor reforzadas con un material aislante, consiguiendo además, que la fuente sonora entre ajustada en el interior de la caja impidiendo la creación de un campo sonoro en su interior. El hecho de que la fuente sea unidireccional también favorece las condiciones de ensayo, ya que la onda sonora generada incide directamente sobre la probeta.

A su vez los materiales de ensayo han sido seleccionados entre los que habitualmente se utilizan para el aislamiento en edificios y también en máquinas de uso al aire libre, como por ejemplo, grupos electrógenos o compresores. Estos materiales han sido etiquetados como: M1, M2, M3, y M4. También se ha ensayado una probeta de chapa de acero M5 similar a la utilizada en la fabricación de la caja, así como el material de poliuretano (M6) adherido interiormente a la chapa de acero. Las características principales de todas las probetas se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. - Tipos de probetas ensayadas y características principales.

	TIPO DE MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
M1	POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD	DENSIDAD: 30 Kg./m ³ ESPESOR: 40 mm
		Reticulación física
		Retardante de llama
M2	ETILENO PROPILENO DIENO (Caucho sintético)	DENSIDAD: 95 Kg./m ³ ESPESOR: 40 mm
		Celda semi-cerrada
		Retardante de llama
M3	LANA DE ROCA VOLCÁNICA IMPREGNADA CON RESINA	DENSIDAD: 145 Kg./m ³ ESPESOR: 40 mm
		Sin revestimiento
		Resistencia al fuego M0. No combustible.
M4	LANA DE ROCA VOLCÁNICA IMPREGNADA CON RESINA Y CON REVESTIMIENTO EN UNA CARA	DENSIDAD: 145 Kg./m ³ ESPESOR: 40 mm
		Con revestimiento de velo mineral
		Resistencia al fuego M0. No combustible.
M5	CHAPA DE ACERO	DENSIDAD: 7850 Kg./m ³ ESPESOR: 6 mm
		Acero extrasuave F-111
M6	POLIURETANO	DENSIDAD: 25 Kg./m ³ ESPESOR: 40 mm

Las dimensiones de la probeta de acero son 478 x 398 x 6 mm, mientras que el resto de probetas miden 478 x 398 x 40 mm. La capacidad del acero (M5) como aislante se rige por la ley de masa y difiere bastante del comportamiento de los materiales de baja densidad (M1, M2 Y M6), que al ser porosos actúan absorbiendo energía acústica. Por otra parte, la lana de roca (M3 y M4) tiene un comportamiento intermedio.

En la figura 5.4 se muestran las probetas de los materiales ensayados, excepto el material colocado en el interior de la caja M6, que se puede apreciar en la figura 5.3.

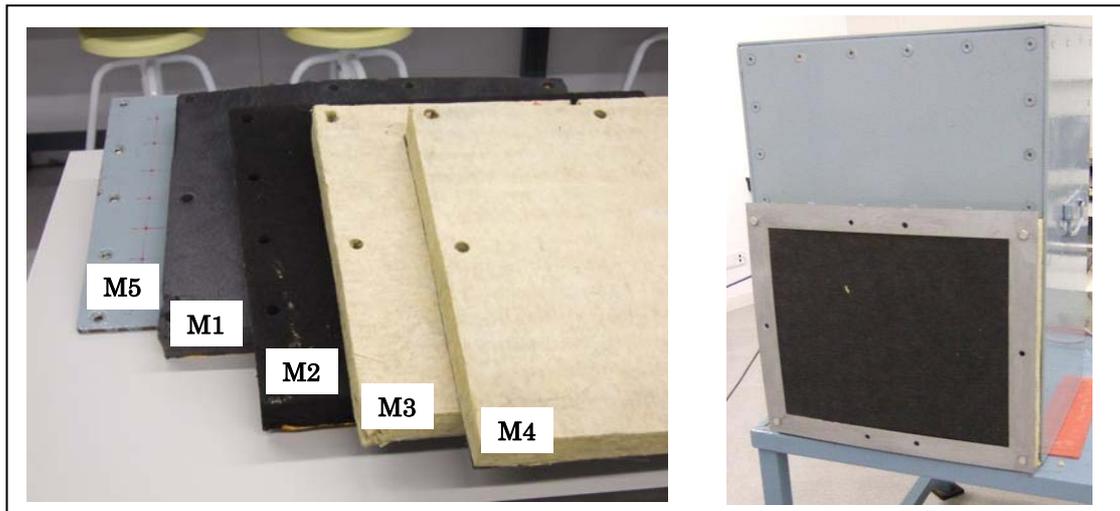


Figura 5.4.- Relación de materiales ensayados: M1 polietileno, M2 caucho sintético, M3 lana de roca, M4 lana de roca con revestimiento y M5 acero de 6 mm. A la derecha se muestra el montaje de la probeta M2 en la estructura de ensayo.

Las probetas se sujetan a la estructura de ensayo por medio de un marco de acero atornillado que presiona ligeramente la probeta contra la caja, minimizando la transmisión del sonido por cualquier otra parte que no sea la superficie de ensayo, tal y como se muestra en la figura 5.4.

5.3.- Recursos técnicos

Se entiende por recursos técnicos, la instrumentación empleada para la realización de las medidas de intensidad sonora, del análisis modal, así como el software empleados en el procesado de las medidas.

También se incluye en este apartado, el software de modelización de la estructura de ensayo con la probeta de acero montada, y que será ampliamente comentado más adelante.

5.3.1.-Fuente sonora

La fuente sonora unidireccional es introducida en el interior de la caja que forma la estructura de ensayo, ajustada por todas las caras menos por la frontal que es donde se sitúan las probetas. Se ha utilizado una fuente sonora marca Brüel & Kjaer modelo 4224, que permite reproducir diversos espectros de banda ancha normalizados; o bien, generarlos externamente e introducir la señal a través del conector de entrada de la fuente sonora para reproducirlos. Este último supuesto es

el que se ha utilizado, se genera un espectro de ruido rosa externamente, y la fuente sonora lo aplica directamente sobre las probetas a ensayar. La amplitud máxima de potencia sonora que puede emitir la fuente, en el rango de los 100 Hz a los 4kHz, es de 115 dB con alimentación por baterías, y de 118 dB conectada a la red. En la figura 5.5 se muestra la fuente sonora cuyo peso es de 18 kilogramos, siendo sus dimensiones principales de 480 x 380 x 242 mm.



Figura 5.5. Fuente sonora 4224 de la firma comercial Brüel & Kjaer empleada en los ensayos.

Un factor importante en el desarrollo de los ensayos son las características de direccionalidad de la fuente sonora, tanto en el plano vertical como en el plano horizontal. Con la fuente sonora unidireccional utilizada, se consigue que la mayor parte de la energía sonora emitida pase a través de la superficie definida por la probeta, siendo despreciable la energía transmitida por cualquiera de las otras caras de la caja de ensayo. La fuente sonora puede utilizarse con un difusor aplicado en el caso de requerir un campo sonoro más o menos difuso. Esta aplicación solamente tiene sentido cuando se realizan medidas in-situ de aislamiento acústico entre dos recintos, es decir, en medidas dirigidas a determinar en índice de reducción sonora (R), o cualquier otro, que defina el aislamiento de un paramento vertical de una vivienda o de un edificio. En el presente trabajo, no se ha utilizado el difusor ya que realmente interesaba utilizar al máximo las características unidireccionales de la fuente sonora. En la figura 5.6 se muestra la direccionalidad en el plano horizontal de la fuente generando una onda sonora a 2kHz; y en el plano vertical, generando ondas a 200 Hz, 630 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz.

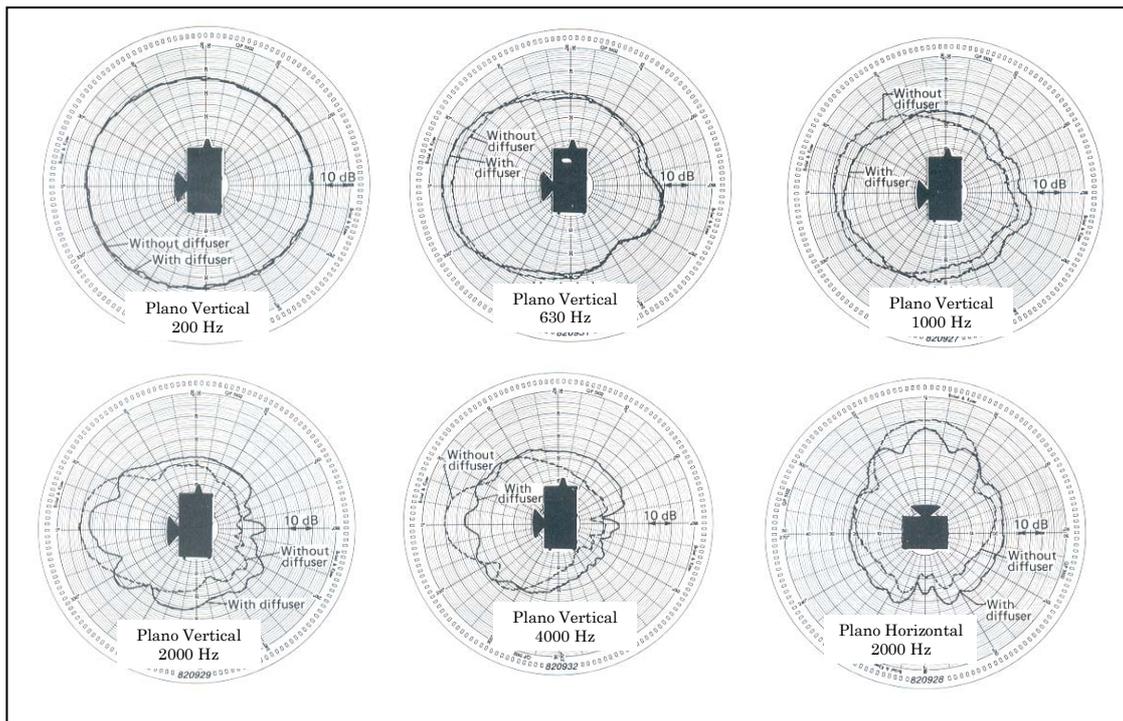


Figura 5.6.- Características direccionales de la fuente sonora modelo 4224 de la marca comercial Brüel & Kjaer.

La fuente sonora posee características casi omnidireccionales a frecuencias bajas, aproximadamente hasta los 200 Hz. Al aumentar la frecuencia la fuente es claramente unidireccional en el plano vertical y horizontal, como se puede apreciar en la figura 5.6.

5.3.2.-Sonda de intensidad sonora

La sonda es el elemento clave en la cadena de medida a la hora de obtener el vector de la intensidad sonora. La constitución de dicha sonda es muy simple, la forman dos micrófonos montados muy próximos y sujetos a una estructura común. No obstante, deben reunir una característica fundamental, la diferencia de fase de la señal de los micros durante el proceso de medida debe ser mínima. Comercialmente, los micrófonos que van a formar parte de una sonda se venden juntos, ya que deben estar equilibrados para no introducir errores de fase durante la medida.

En la figura 5.7 se muestra la sonda de intensidad utilizada, modelo 3595 acoplable al sonómetro modelo 2260 de la marca comercial Brüel & Kjaer. La cadena de medida del transductor la forman dos preamplificadores modelo 2683 y dos micrófonos modelo 4197 de B&K.



Figura 5.7.- Sonda de intensidad modelo 3595 de B&K utilizada en la realización de las medidas.

La sonda viene provista de tres separadores estándar de micrófono: 9.5 mm, 12 mm y 50 mm. Ninguno de los separadores permite cubrir la totalidad del rango de frecuencia de interés. Las medidas del índice de reducción sonora (R) o parámetro equivalente, se realizan entre los 100 y los 3150 Hz normalmente. Para poder abarcar todo el rango es necesario utilizar los separadores de 12 mm y 50 mm, véase el apartado 4.2.8 del capítulo 4. La necesidad de realizar varias medidas con distinto separador sobre la misma probeta resulta un problema que habitualmente se traduce en imprecisiones de medida. Para evitarlo es necesario diseñar un nuevo separador que cumpla con los requisitos de precisión para todo el rango de frecuencia.

Teniendo en cuenta lo establecido en el capítulo 4, el nuevo separador debe evitar el error relacionado con la aproximación por diferencias finitas a alta frecuencia (apartado 4.2.1) y el error relacionado con el desajuste de fase de la instrumentación de medida a baja frecuencia (apartado 4.2.2). Para la realización de las medidas se ha fabricado, en baquelita de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro, un nuevo separador de micrófonos. Para calcular la longitud idónea en función del ancho de banda requerido se deben cumplir los siguientes requisitos:

1º.- Longitud máxima del separador para evitar el error por diferencias finitas.

Este tipo de error se evita cuando la longitud de onda a medir es al menos seis veces superior a la distancia que separa los micrófonos, es decir la longitud del separador, $\lambda \geq 6 \cdot \Delta r$. Como la frecuencia superior es 3150 Hz, su longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344}{3150} = 0,1092 \text{ m}$$

Y por lo tanto, la distancia de separación de los micrófonos debe ser al menos seis veces inferior, es decir,

$$\Delta r \leq \frac{\lambda}{6} \leq \frac{0,1092}{6} \leq 0,0182$$

Por lo que la longitud del separador tiene que ser de 18.2 mm o menor. El separador diseñado finalmente mide 18 mm, por lo que la frecuencia límite superior pasa a ser,

$$\lambda = 6 \times 0,018 = 0,108 \text{ m} \qquad f = \frac{c}{\lambda} = \frac{344}{0,108} = 3185 \text{ Hz}$$

2º.- Longitud mínima del separador para evitar el error por desajuste de fase entre los canales del equipo de medida.

Se debe cumplir que la diferencia de fase a medir por los dos micrófonos debido a su diferente ubicación espacial debe ser cinco veces superior al desajuste de fase entre canales del equipo de medida. Sabiendo que la sonda comercial utilizada tiene un desajuste de fase inferior a 0.35 grados y que la frecuencia inferior de interés es de 100 Hz, es necesario determinar si la longitud de 18 mm del separador también cumple este requisito a baja frecuencia.

Para ello, $\phi = k \cdot \Delta r \geq 5 \cdot \varphi$

$$f = \frac{k \cdot c}{2\pi} \qquad 100 = \frac{k \cdot 344}{2\pi} \qquad k = \frac{100 \cdot 2\pi}{344} = 1,825 \text{ m}^{-1}$$

$$\phi = k \cdot \Delta r = 1,825 \times 0,018 \times \frac{360}{2\pi} = 1,88^\circ$$

Finalmente, el ángulo máximo de desfase que se permite a la cadena de medida es claramente superior al requerido.

$$\varphi = \frac{1,88}{5} \leq 0,376^\circ$$

Por lo tanto, el separador de micrófonos de 18 mm de longitud permite realizar las medidas en el rango de interés desde los 100 Hz a los 3150 Hz. Es muy probable que en el futuro los errores por desajuste de fase sean minimizados debido al avance de la tecnología de medida. No obstante, hay que cumplir también los criterios de validación de las medidas en cuanto a capacidad dinámica, repetibilidad y presencia de fuentes parásitas, que dependen exclusivamente de las condiciones concretas del campo sonoro a medir, de la pericia del operador y de la precisión requerida. En la figura 5.8 se pueden ver los índices de presión-intensidad residual de la sonda utilizada en función de cada uno de los separadores disponibles, incluido el separador de 18 mm de longitud que ha sido fabricado específicamente para la realización de las medidas de la presente tesis.

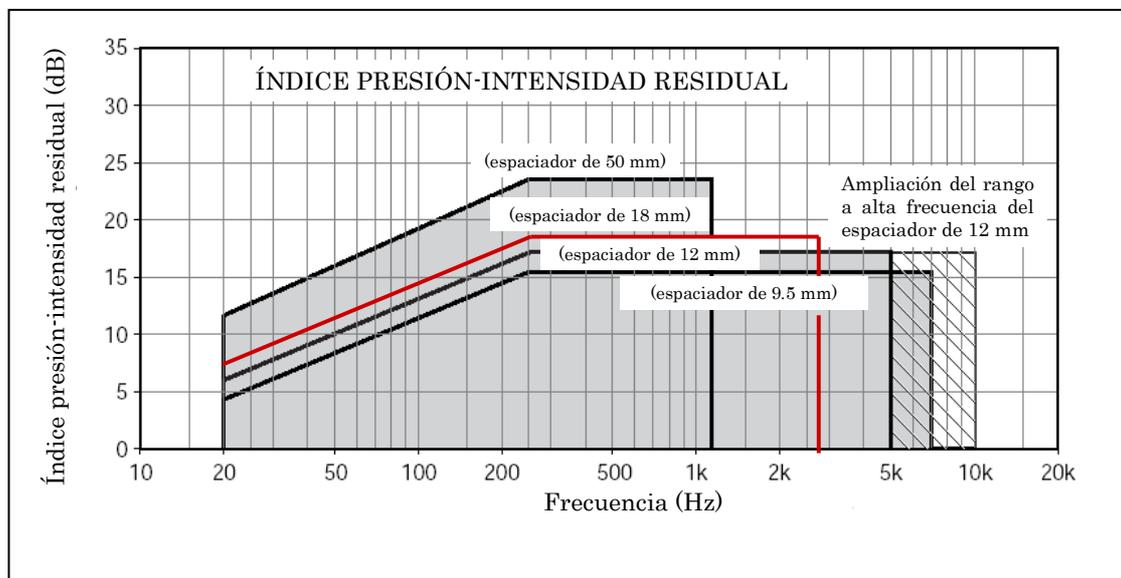


Figura 5.8. Índices presión-intensidad residual de la sonda modelo 3595 de la marca Brüel & Kjaer en función de los distintos separadores. En rojo el índice correspondiente al separador de 18 mm, fabricado para realizar medidas desde 100 Hz hasta 3150 Hz.

La sonda de intensidad con el espaciador de micrófonos de 18 mm, permite realizar de una sola vez cada barrido sobre las superficies objeto de ensayo, ganando tiempo en el proceso de medida y también precisión, sobre todo a efectos de validar la repetibilidad y la capacidad dinámica.

En el supuesto de utilizar dos espaciadores para barrer todo el ancho de banda (desde 100 Hz a 3150 Hz), al no realizarse el barrido simultáneamente, se pueden cometer errores de medida para una parte del espectro y para la otra no, resultando bastante engorroso el procedimiento de medida.

5.3.3.-Procesado de las medidas con sonómetro modelo 2260 B&K

El procesado de las medidas se ha realizado con el sonómetro modelo 2260 Investigator de B&K, figura 5.9, por medio de el módulo BZ 2005. Este equipo de medida determina la intensidad sonora por el método directo.

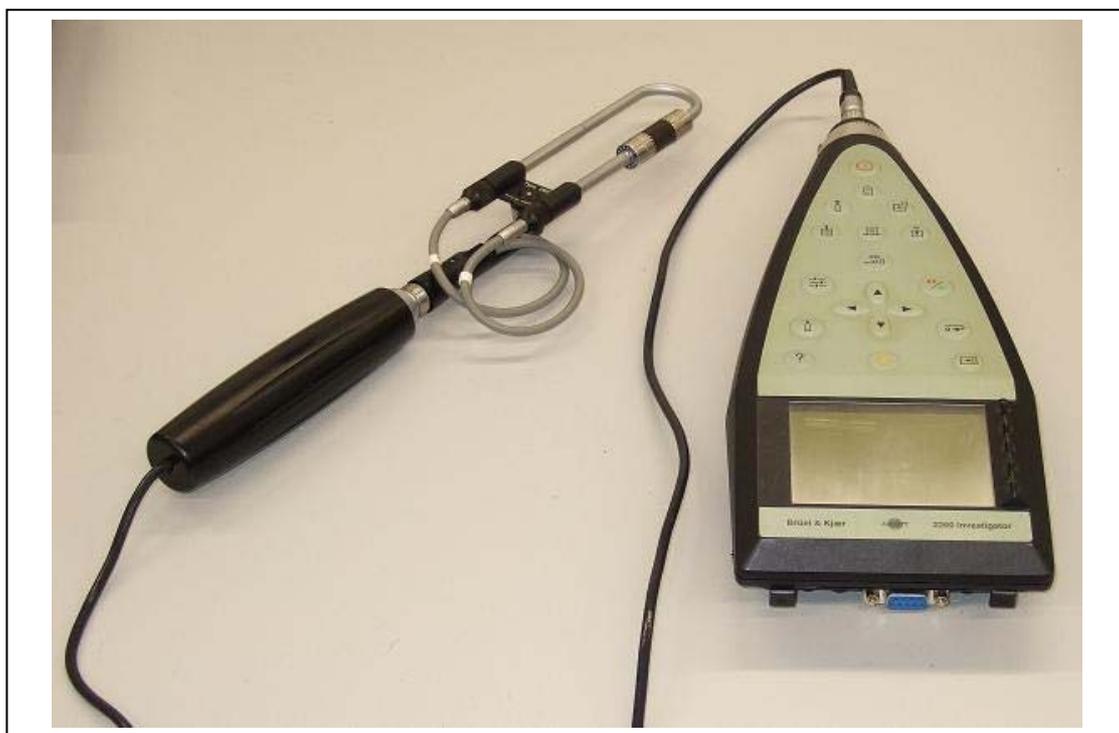


Figura 5.9.- Sonómetro modelo 2260 Investigator de B&K, con la sonda de intensidad acoplada.

La portabilidad del equipo de medida es una de sus grandes ventajas, pero la más importante, es el alto grado de simultaneidad que posee al medir la diferencia de fase entre ambos canales. Aunque la especificación del equipo incluye la posibilidad de medir entre 50 Hz y 10kHz con un separador de 12 mm de longitud, en la práctica, es casi imposible conseguir el grado de precisión de control que es el más bajo de los normalizados según la norma UNE EN ISO 9614.

El software necesario para el procesado de los datos (BZ 7205) debe estar cargado en el sonómetro 2260 antes de iniciarse el proceso de medida. En primer lugar se define dimensionalmente la superficie que va a ser barrida, el tipo de separador a utilizar, el ancho de banda en estudio, así como el grado de precisión requerido si la medida va a estar sujeta a una norma estándar específica. Este equipo permite medir teniendo en cuenta diversas normas internacionales, entre otras: ISO 9614-2 (1996), ECMA-160 (1992) y ANSI S12.12 (1992).

La norma seleccionada para la realización de las medidas ha sido UNE EN ISO 9614-2. No obstante, todos los datos han sido volcados a un ordenador y procesados con la ayuda de una hoja de cálculo para obtener los diversos espectros. Así mismo, para la validación de las medidas con la máxima precisión posible, se ha tenido en cuenta también los límites especificados en la norma UNE EN ISO 9614-3.

Antes de comenzar las medidas debe calibrarse el equipo. En el proceso de calibración debe tenerse en cuenta, que además de ajustar la sensibilidad de los micrófonos individualmente, hay que determinar el índice de presión-intensidad residual. El sonómetro modelo 2260 Investigator de B&K puede ser calibrado acoplando la sonda de intensidad sonora al calibrador modelo 4297 de la misma marca comercial, figura 5.10.

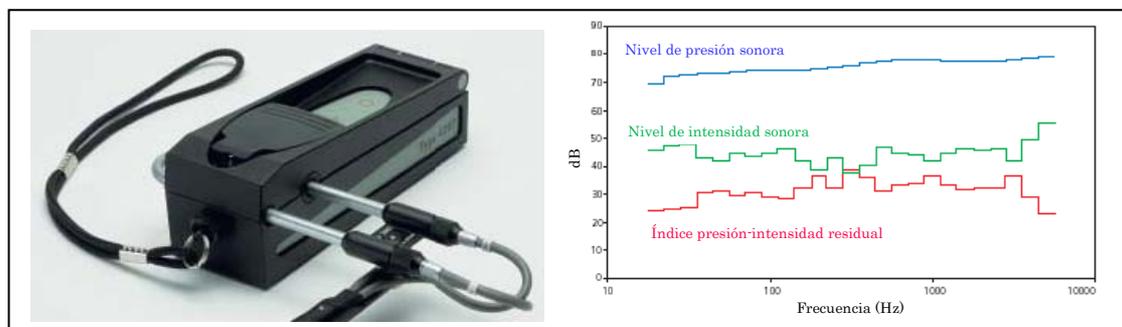


Figura 5.10.- Calibrador modelo 4297 de B&K utilizado para calibrar individualmente la presión sonora y la obtención del índice presión-intensidad residual de la cadena de medida.

En la gráfica de la derecha se aprecia en azul el espectro de presión sonora de la señal del calibrador, en verde el espectro de intensidad sonora medido, que debía ser cero, y en rojo la diferencia entre ambos espectros que define el índice de presión-intensidad residual. Realizada la calibración de la instrumentación y ajustando correctamente los parámetros del set-up de medida se puede comenzar a operar con el equipo. Es importante realizar el procedimiento secuencial establecido en el propio sonómetro 2260, donde se establecen dos barridos con la sonda por cada superficie, pudiéndose borrar cada uno de ellos de forma independiente si se detectara que no se ha operado correctamente. Los errores más comunes de operación son:

- No mantener constante la distancia de separación entre la sonda de intensidad y la fuente sonora.
- Aumentar o disminuir la velocidad de barrido durante el muestreo de una superficie concreta.

- No mantener la perpendicularidad de la sonda de intensidad con respecto al plano virtual que define la superficie de medida.

Si los barridos se han realizado correctamente se procede a la comprobación del cumplimiento de los requisitos establecidos por la norma estándar aplicada: repetibilidad de las medidas de los dos barridos, no exceder los límites de la capacidad dinámica en todo el espectro y no detectar ruidos parásitos externos a la fuente sonora analizada. Dado que el sonómetro 2260 solamente permite validar las medidas in-situ en base a la parte 2 de la norma UNE EN ISO 9614, las medidas se descargan a un ordenador por medio del software 2260LINK y posteriormente se procesan externamente para determinar el cumplimiento de la parte 3 de la citada norma.

En la figura 5.11 se muestran dos pantallas del equipo donde se puede comprobar el cumplimiento de la repetibilidad según la norma estándar seleccionada, en este caso la UNE EN ISO 9614 parte 2, y un espectro de potencia sonora obtenido a partir de la intensidad sonora medida.

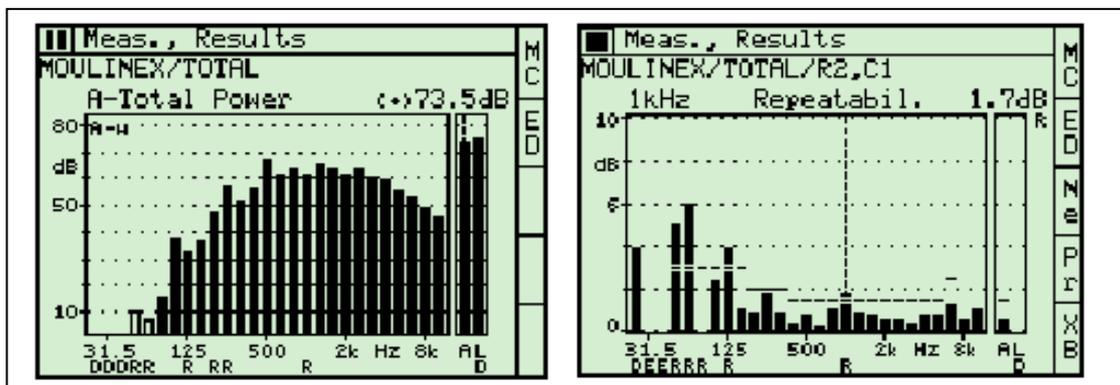


Figura 5.11. - A la izquierda un espectro de potencia sonora de un electrodoméstico obtenido a partir de la medida de la intensidad sonora. A la derecha se muestra la repetibilidad entre barridos para cada frecuencia según la norma ISO 9614-2.

El equipo permite visualizar fácilmente la validación de la medida según la norma por medio de las letras que aparecen en la parte inferior de la pantalla a cada una de las frecuencias. Por ejemplo, en la pantalla de la repetibilidad de la figura 5.11 se puede ver que en la frecuencia donde se ha situado el cursor (línea discontinua vertical en 1kHz) aparece la letra R, que significa que no se cumple el requisito de repetibilidad establecido en la norma para esa frecuencia. Los distintos límites de repetibilidad para cada frecuencia están representados en la gráfica con líneas discontinuas horizontales.

Los espectros de medida se pueden presentar en octavas o tercios de octavas. Dependiendo del separador de micrófonos utilizado, así como del grado de precisión requerido, pueden excluirse aquellas bandas de frecuencia cuyos resultados no puedan ser validados. En cuyo caso, no se tienen en cuenta para el cálculo de los valores globales de cada espectro. En cuanto al separador, el equipo admite desde 6 mm de longitud hasta 200 mm con incrementos de 0.5 mm. Otro aspecto importante, es que con el separador de 12 mm se puede incrementar opcionalmente el límite de frecuencia superior hasta los 10 kHz sin cometer un error significativo [1], siempre y cuando, se utilicen micrófonos de ½ pulgada.

5.3.4.-Analizador multicanal PULSE de B&K

Además del sonómetro 2260 Investigator se ha utilizado un analizador de señal de cuatro canales modelo PULSE de B&K. Las medidas realizadas con dicho equipo permiten relacionar la energía sonora radiada por la chapa de acero de 6 mm con su comportamiento vibratorio, al ser excitada por un martillo para medidas de análisis modal. Con estas medidas se pretende caracterizar el comportamiento de la única probeta rígida, que además es del mismo material que la caja de ensayos. Para poder determinar las frecuencias resonantes de la chapa de acero en el rango de frecuencia de interés, se requiere la utilización de un sensor de fuerza acoplado al martillo para la excitación; así como, un acelerómetro que obtenga la respuesta del sistema.

Con estos dos parámetros se puede conseguir la matriz de transferencia de la probeta de acero, dividiendo la velocidad de la vibración entre la fuerza de excitación en diversos puntos de la superficie de la chapa de acero. La relación así obtenida se conoce como movilidad. Tratados los resultados convenientemente se puede determinar los modos de vibración de la chapa de acero y visualizar por medio de una animación el movimiento físico de la probeta.

Además de la movilidad se ha medido simultáneamente la intensidad sonora radiada por la chapa a causa de la excitación, para ello, se ha utilizado la sonda modelo 3595 de B&K a la que se le ha acoplado la unidad de control remoto ZH 0632 de la misma marca comercial. Este accesorio permite controlar el inicio y final de una medida así como su borrado o su almacenado, directamente por el operador desde la empuñadura de la sonda de intensidad, figura 5.12.

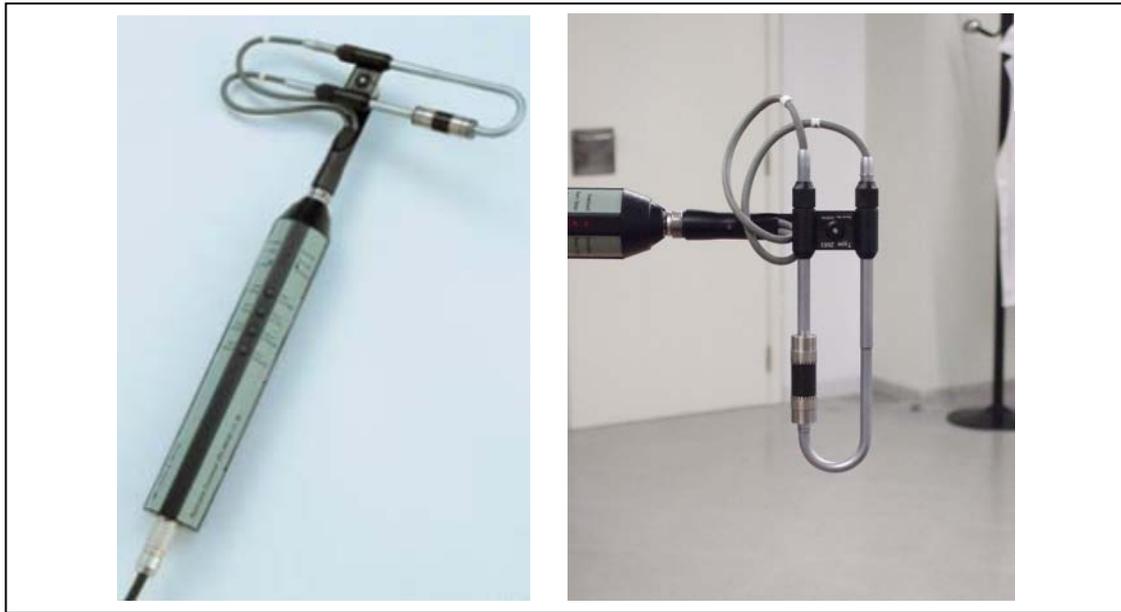


Figura 5.12. - Detalle de la sonda de intensidad utilizada con PULSE de B&K. La unidad de control remoto ZH 0632 a la que se ha acoplado la sonda facilita la realización de las medidas.

Como se comentó anteriormente, además de la sonda de intensidad, se han utilizado otros transductores de medida para obtener algunos parámetros modales, como es el caso de las frecuencias naturales de la chapa de acero. A continuación se definirán las características principales de ambos sensores: el acelerómetro y el transductor de fuerza.

El acelerómetro utilizado en la realización de las medidas con PULSE, es el modelo 4508 B de B&K con tecnología Delta Tron. Es un transductor de tamaño reducido fabricado en titanio con 4.8 gramos de peso y cuyas dimensiones son 10 x 10 x 10 mm. Se caracteriza por su alto ratio sensibilidad/peso que lo hace idóneo para la ejecución de medidas de análisis modal. Su sensibilidad es de 10 mV/ms⁻² y su rango útil en frecuencia, con buenas características de linealidad, de 0.3 Hz a 8000 Hz.

La sujeción del acelerómetro a la superficie de medida se realiza por medio de un clip de montaje, pegado con cianocrilato o cera, sobre el que se monta el acelerómetro por medio de unas guías que lleva mecanizadas. La fijación del acelerómetro a la superficie de medida es fundamental, ya que de ello depende el ancho de banda efectivo de la medida en condiciones de linealidad. En la presente tesis, las medidas se han realizado utilizando estos clips de montaje y han sido pegados con cianocrilato, manteniendo buenas características de linealidad al menos hasta los 2 kHz.

Los elementos que componen el acelerómetro se pueden apreciar con detalle en el despiece de la figura 5.13. Los piezoelectricos laterales funcionan a cortadura por la acción de una masa sísmica colocada entre ambos.

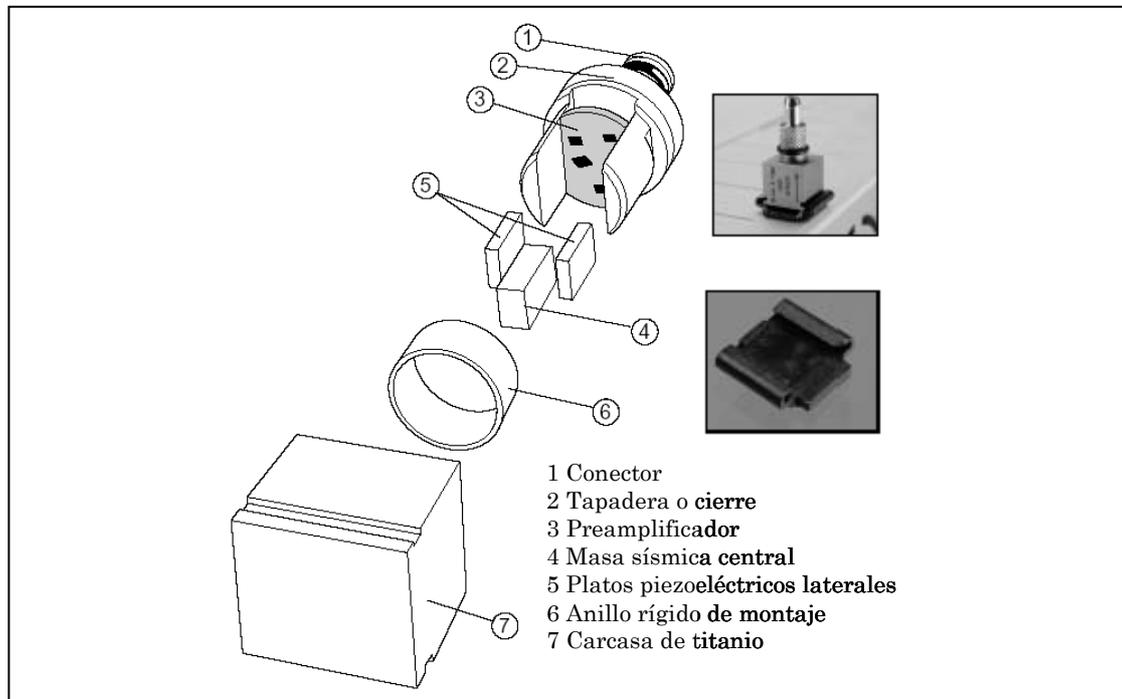


Figura 5.13.- Detalle de la composición de un acelerómetro Delta Tron modelo 4508 B de B&K. También se muestra el procedimiento de sujeción del acelerómetro por medio de un clip de montaje.

Para la excitación se ha utilizado un transductor fabricado específicamente para las medidas de análisis modal. Se ha diseñado un martillo con un sensor de fuerza Isotron modelo 2311-100 de la firma comercial ENDEVCO. Las dimensiones del transductor son 19.1 mm de diámetro por 15.8 mm de altura, siendo su peso de 30 gramos. El rango de medida de cargas dinámicas es de ± 220 N, siendo la carga estática máxima que puede soportar de 4400 N a compresión y 2200 N a tracción. La sensibilidad del transductor es de 22.7 mV/N. La estructura del martillo ha sido diseñada para obtener una buena respuesta en frecuencia, para ello se ha construido un mango ligero de aluminio sujeto a la masa de inercia que actúa sobre el sensor de fuerza fabricado en acero. En el otro extremo del transductor se colocan las punteras que golpean sobre la estructura a excitar, pudiendo ser éstas de acero, aluminio o nailon. El peso del martillo sin masa adicional y con puntera de nailon es de 145 gramos. En el caso de ser necesario aumentar la masa de inercia se puede atornillar en el extremo otra masa supletoria de 39 gramos de peso. Las dimensiones del

excitador se muestran en la figura 5.14, así como los pesos de los distintos elementos que constituyen el martillo de excitación.

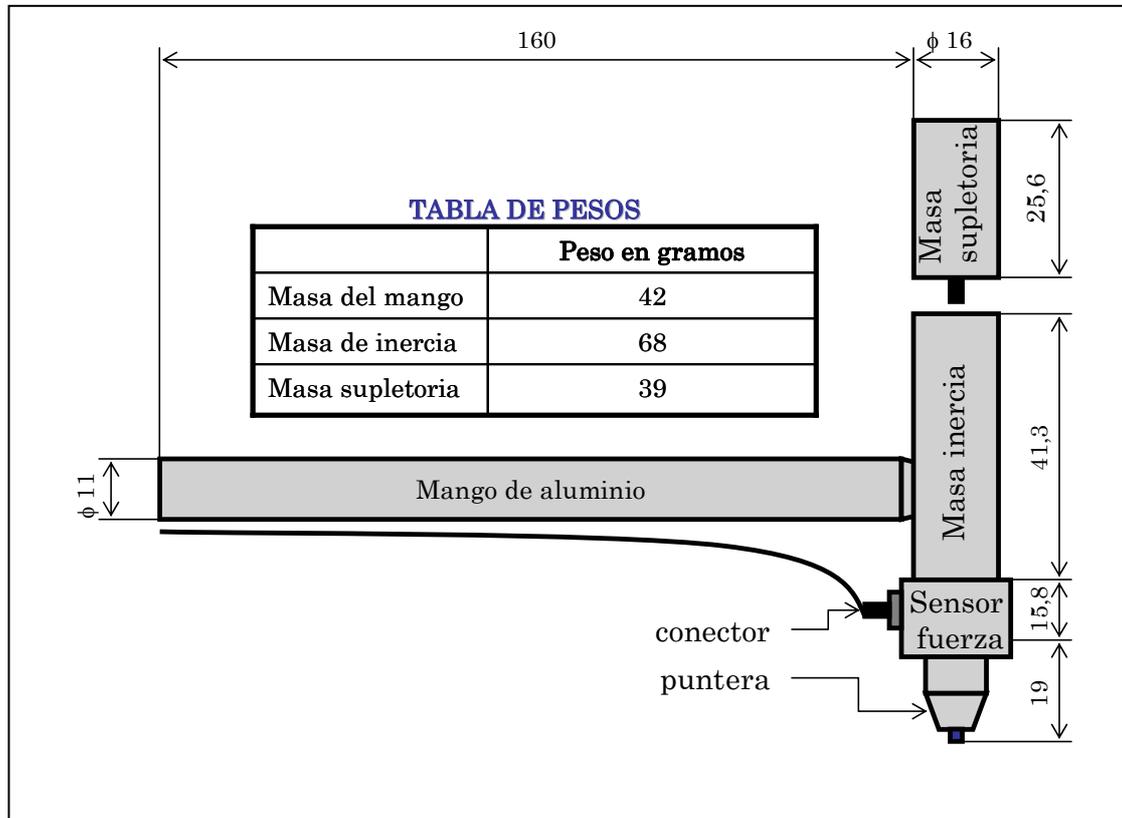


Figura 5.14. - Dimensiones y pesos de los distintos elementos del martillo diseñado para realizar las medidas de análisis modal.

En la ejecución de las medidas de análisis modal se han utilizado los cuatro canales del analizador multicanal PULSE de B&K. Dos canales se han empleado en la determinación de la intensidad sonora, uno por cada micrófono. Los otros dos canales se han utilizado para conectar el acelerómetro y el sensor de fuerza del martillo. Dado que PULSE es una plataforma flexible en cuanto a su configuración de canales es necesario determinar que versión se ha utilizado. En concreto la cadena de medida está formada por los transductores ya mencionados y la plataforma denominada como PULSE tipo 3560 C.

Esta plataforma es un sistema de adquisición de datos que se puede considerar portátil. Está constituida por un módulo de alimentación DC tipo 2827, por un módulo controlador que permite la comunicación entre el hardware y un PC por medio de una conexión de red LAN, y por último, un módulo de entrada/salida que consta de cuatro canales de entrada y dos de salida.

La filosofía de funcionamiento de PULSE, figura 5.15, está basada en la creación de un proyecto de medida a modo de plantilla, que debe ser determinado previamente por medio de cuatro pantallas organizadoras, que son: el organizador de configuración, el organizador de medida, el organizador de funciones y el organizador de pantallas. En la figura 5.15 se muestran también la pantalla de PULSE con los distintos organizadores.

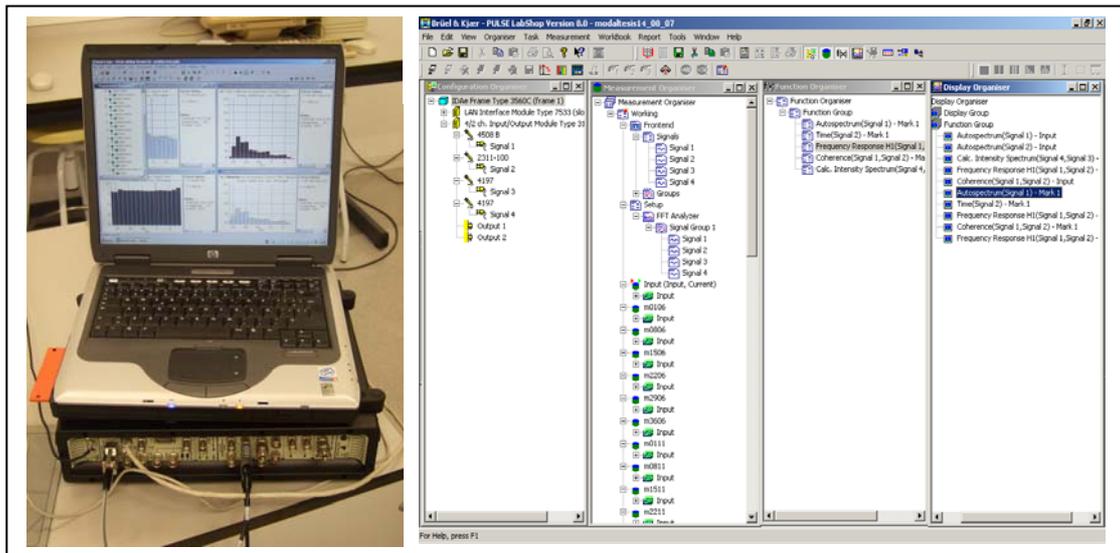


Figura 5.15.- A la izquierda la plataforma PULSE utilizada conectada a un ordenador portátil. A la derecha la pantalla con los cuatro organizadores abiertos.

El *organizador de configuración* permite definir la cadena de medida introduciendo los transductores y permitiendo su calibración. A los transductores se les asignan señales de medida que deben formar parte de un grupo sobre el que se definen los parámetros comunes del set-up de medida. El *organizador de medida* permite definir los analizadores (FFT, CPB, etc) y su configuración, los grupos de señales que serán procesados por cada analizador y las medidas que han de ser almacenadas o rechazadas. El *organizador de funciones* es el encargado de realizar el post-procesado de las medidas resultantes de los analizadores, así como definir los parámetros de presentación de las medidas. Por último, el *organizador de pantallas* permite configurar la disposición de los gráficos en la pantalla, agrupando los resultados a conveniencia del operador.

Una vez definidos todos los organizadores, el equipo está en condiciones de medir. Los proyectos guardados pueden ser abiertos posteriormente, conservando todo lo programado en los distintos organizadores.

5.3.5.-Introducción a la modelización SEA

El Análisis Estadístico de Energía (SEA) es un método para estimar los niveles de ruido y vibración en estructuras complejas. El método se aplica en muchos sectores de la ingeniería: aeroespacial, automovilística, ferroviaria, naval y civil. En este apartado se proporciona una idea sobre este método de análisis estructural antes de proceder a explicar la modelización realizada con un software comercial concreto. Es necesario conocer los aspectos teóricos de SEA, sobre todo su rango de aplicación y sus limitaciones, con el objetivo de no cometer errores significativos en la interpretación de los resultados. Existen un número ya considerable de publicaciones donde se puede obtener más información [2], [3]. El planteamiento SEA puede describirse considerando la forma en que la naturaleza de la respuesta dinámica de una estructura depende de la frecuencia de excitación. Las fuerzas de excitación pueden ser clasificadas en general como: de baja frecuencia, de media frecuencia y de alta frecuencia. No existe un rango de frecuencia definido para cada uno de estos rangos, depende de la estructura misma. Igualmente, no existe una técnica de modelización de estructuras que pueda utilizarse para modelizar la estructura en un ancho de banda extenso, normalmente cada técnica es más apropiada para un rango de frecuencia concreto,

- Si la excitación es a baja frecuencia se activan los primeros modos de la estructura, la respuesta del sistema, en forma de vibración y ruido, se pueden estimar con aceptable precisión utilizando el Método de los Elementos Finitos (FEM).
- Si la excitación afecta a modos superiores, el Método de los Elementos Finitos no es capaz de hacer una buena predicción, además de requerir grandes recursos computacionales. La respuesta de la estructura puede ser sensible a los pequeños detalles de fabricación, por lo que normalmente dos estructuras idénticas pueden mostrar significativas diferencias modales, sobre todo en los puntos de encuentro o acoplamiento de los elementos que la forman. A frecuencias medias es relativamente fácil obtener diferencias de hasta 10 dB en niveles de ruido generado por máquinas iguales, cuando se ensayan en número suficiente. A estas frecuencias se suele obtener buenos resultados si se modeliza la estructura por el Método de los Elementos de Contorno (BEM).

- Si la excitación es a alta frecuencia, los modos más altos de la estructura son activados, y en este caso, la longitud de onda característica de la deformación estructural es mucho menor que las dimensiones globales de la estructura. Se suele aceptar de forma general, que un modelo detallado de elementos finitos de la estructura no es factible en este rango de frecuencias, debido al elevado número de grados de libertad que se requieren para calcular las deformaciones generadas. Se sabe que a frecuencias altas la respuesta del sistema es menos sensible a pequeños cambios en las propiedades de la estructura, debido al fenómeno de superposición modal. El ancho de banda de un modo resonante es grande comparado con el intervalo de frecuencia seleccionado en el procesamiento de la señal, por lo que los picos modales en la función de respuesta en frecuencia o función de transferencia se mezclan todos, no apreciándose modos simples dominantes. Además, la variabilidad debido a los detalles estructurales que generan incertidumbres en los resultados, se reduce bastante a frecuencias altas. SEA está dirigido primordialmente a predecir niveles de vibración y ruido de alta frecuencia, ya que el Método de los Elementos Finitos no es una opción viable. El Método de Análisis Estadístico de Energía (SEA) también puede ser aplicado, en muchos casos, en el rango de las bajas y medias frecuencias aunque disminuyendo su fiabilidad.

El planteamiento de modelado adoptado por SEA difiere fundamentalmente del FEM. En el Método de los Elementos Finitos los grados de libertad son los desplazamientos y rotaciones de ciertos puntos (nodos) y las ecuaciones de gobierno son las ecuaciones del movimiento, que surgen como combinación de la segunda ley de Newton y los principios de la elasticidad y resistencia de materiales. En contraste, los grados de libertad en el Método de Análisis Estadístico de Energía es la energía vibracional o acústica, y las ecuaciones de gobierno son derivadas sobre la base de la conservación del flujo de energía.

Mientras que la segunda ley de Newton y los principios de la mecánica estructural son válidos en infinidad de casos relacionados con la ingeniería, por el contrario, las hipótesis SEA con respecto al flujo de energía son válidas con restricciones y el método se considera limitado. A menudo el método es muy eficiente en términos de esfuerzo computacional y puede ser usado en medias y altas

frecuencias, donde los elementos finitos se consideran inviables. Queda claro, que en el análisis estadístico de energía (SEA), la energía es utilizada como un grado de libertad. El aspecto estadístico está relacionado con el hecho de que el resultado final se puede considerar ajustado al promedio de los valores de vibración o ruido de una serie de estructuras similares.

5.3.6.-Fundamentos del modelado SEA

El análisis estadístico de energía no predice el patrón espacial detallado de la respuesta de una estructura a cada frecuencia con una excitación simple. Realmente el método predice la respuesta promedio en tres sentidos: el promediado espacial, el promediado en frecuencia y el promediado del conjunto de estructuras similares. El promediado espacial es una consecuencia derivada de que este método predice la energía vibracional total almacenada en una región de la estructura, en lugar de la densidad de energía vibracional en un punto particular. El promediado en frecuencia tiene que ver con la circunstancia de que SEA predice la energía almacenada en cada banda de frecuencia, que puede ser de ancho constante o puede ser de ancho proporcional, por ejemplo en octavas o tercios de octava. El promediado del conjunto se refiere al promediado tomado sobre un número de estructuras aparentemente idénticas, es decir, estructuras que en principio son iguales pero cuyas propiedades dinámicas difieren aleatoriamente debido a las tolerancias de fabricación, precisión de montaje, etc. Este promediado no se realiza realmente, si no que es consecuencia de un número de suposiciones derivadas de las ecuaciones SEA. Por consiguiente, la salida de un análisis SEA es el promedio de energía vibracional almacenada en varias regiones del sistema, en cada conjunto de bandas frecuencias concretas y como valor promedio de un conjunto de estructuras similares.

Para entender los conceptos utilizados en el análisis SEA, es necesario interpretar el concepto de flujo de energía que fluye de una parte de la estructura a otra. Estos elementos simples estructurales pueden ser piezas soldadas entre si, atornilladas o simplemente en contacto más o menos rígido. El fundamento del método se puede explicar de forma muy básica considerando dos elementos estructurales que forman parte de una estructura más compleja al estar unidos entre sí. Cada elemento o subsistema tendrán un nivel de energía propio debido a la excitación exterior, más la energía transferida desde otro elemento o subsistema y menos la energía que transfiere.

En la figura 5.16 se muestra una analogía hidráulica, donde el aporte de agua a través de los grifos a los depósitos representa la excitación externa del subsistema. El paso del fluido de un depósito a otro se relaciona con la transferencia de energía neta entre los distintos subsistemas.

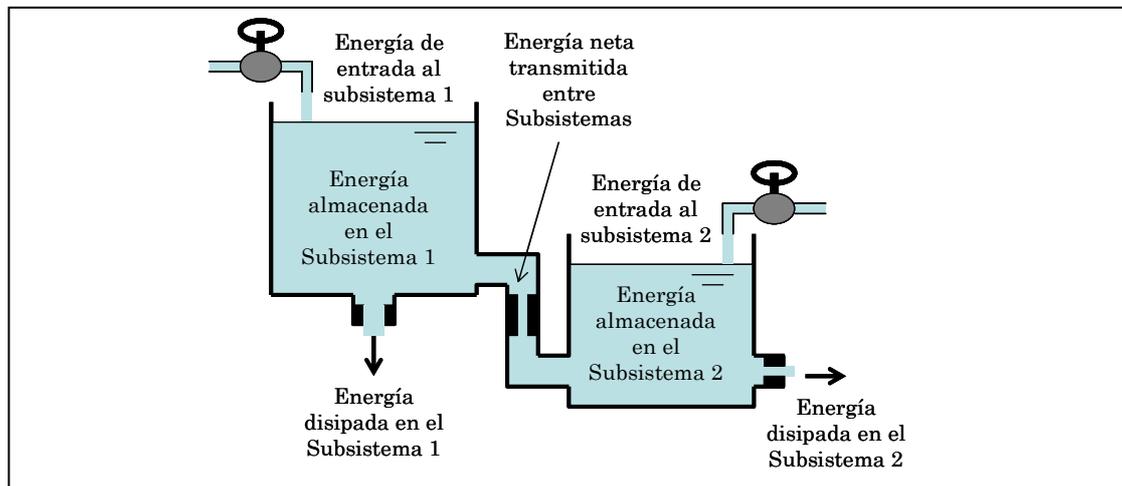


Figura 5.16. - La analogía hidráulica describe perfectamente los fundamentos del método SEA.

La salida de fluido representa la energía evacuada al exterior, por ejemplo en forma de ruido, o absorbida por la propia estructura debido al amortiguamiento interno. El nivel de fluido de cada depósito representa la energía vibracional o acústica que posee un subsistema.

5.3.7.-El concepto de subsistema en el modelado SEA

En el apartado anterior se expuso que los grados de libertad adoptados por el método SEA están vinculados a la energía vibracional y acústica de cada zona o región del sistema. Para ser más preciso el sistema es considerado como un ensamblaje de “subsistemas” a los que se le asigna un grado de libertad. La idea de subsistema es abstracta y hay diversas formas en la que una estructura puede ser descompuesta en ellos. No existe una forma que se considere necesariamente correcta, aunque algunas disposiciones producen mejores modelos SEA que otras. Por ejemplo, si consideramos un automóvil como un sistema, éste se puede descomponer en un conjunto de subsistemas como son: cada una de las puertas, el bastidor, el techo, etc. Apréciase que aún se puede seguir descomponiendo los subsistemas en elementos más pequeños. Por lo tanto, un subsistema es un elemento físico, pero este elemento puede estar solicitado con diversos tipos de esfuerzos

dinámicos: a cortadura, a flexión en un plano determinado, a torsión, etc. Por consiguiente, un subsistema no debe representar exclusivamente a un elemento físico, si no que está ligado a éste y al movimiento que exhibe.

5.3.8.-Propiedades de los subsistemas, densidad y superposición modal

Una de las propiedades físicas clave de un subsistema es la densidad modal, $n(\omega)$, que se define como el número promedio de modos resonantes existentes por unidad de frecuencia. En muchos casos la densidad modal puede ser estimada con razonable precisión. Otra característica importante de un subsistema es el factor de solapamiento modal, $M(\omega)$, que está relacionado con la densidad modal y el factor de pérdida por amortiguamiento, $M(\omega) = \omega \cdot \eta \cdot n(\omega)$. En la figura 5.17 se muestra de forma gráfica el concepto de solapamiento modal.

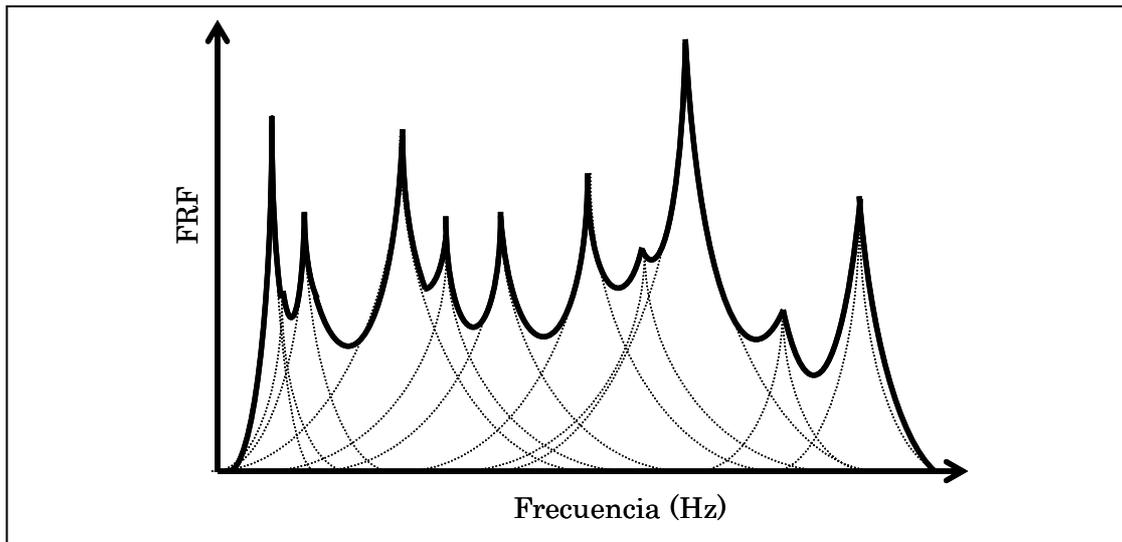


Figura 5.17.- El solapamiento modal está relacionado con el número de modos por ancho de banda y con el factor de pérdida por amortiguamiento de cada modo, que tienen que ver con la anchura de cada pico resonante.

El factor de pérdida por amortiguamiento η está relacionado con la cantidad de energía disipada por un subsistema y se define como la mitad de la anchura en frecuencia de un pico resonante cuando decae 3 dB. La relación existente entre el factor de pérdida η y el coeficiente de amortiguamiento c de un modo concreto viene dado por la expresión (5.1). Donde, m , representa la masa del subsistema.

$$c = 2m \eta \quad (5.1)$$

El factor de solapamiento modal representa la relación del ancho de los picos resonantes en relación a la frecuencia, si el factor toma valores grandes, la función de respuesta en frecuencia (FRF) esperada al aplicar el método de análisis de energía SEA, será una función plana, como si los picos tendieran a fusionarse todos juntos en al ancho de banda.

5.3.9.-La energía como variable en el modelado SEA

Como ha sido descrito previamente, los grados de libertad adoptados por SEA se corresponden con las energías vibracionales de cada subsistema. La energía vibracional es solo la suma de la energía cinética y potencial asociadas con el movimiento del subsistema, si éste tiene un comportamiento resonante entonces las dos energías son iguales. Por lo tanto, la energía vibracional E_i del subsistema i puede considerarse el doble de la energía cinética (5.2) donde m_i es la masa del subsistema i y V_i el valor promedio de la velocidad de la vibración del subsistema de densidad homogénea.

$$E_i = m_i \langle V_i^2 \rangle \quad (5.2)$$

Es evidente que la variable de energía SEA es una entidad física concreta que puede ser medida sobre una estructura determinando la distribución de velocidades de la vibración. Por consiguiente, a la inversa, si la energía de un subsistema puede ser estimada desde el análisis SEA, entonces el promedio de la velocidad en el espacio, también puede ser estimada. Es más, si el subsistema contiene un número razonable de modos resonantes, entonces el valor de la velocidad de la vibración al cuadrado tenderá a ser en la práctica más o menos homogénea, siendo entonces el valor obtenido por la ecuación (5.2) una razonable estimación de la velocidad de vibración de un punto particular. Para calcular las energías de los subsistemas es necesario formular un conjunto de ecuaciones de gobierno sobre la base de un balance energético.

5.3.10.-Ecuaciones de balance de potencia SEA

El objetivo del método SEA es determinar el nivel de energía de cada subsistema, generalmente, sobre condiciones de estado continuas. La excitación de un subsistema se corresponde con la energía introducida en el interior de dicho subsistema por unidad de tiempo.

La energía intercambiada por unidad de tiempo entre subsistemas se corresponde con la potencia transmitida entre ellos, y la energía evacuada o perdida por un subsistema en la unidad de tiempo con la potencia disipada. Por lo tanto, la estimación de los niveles de energía de cada subsistema se obtiene de un conjunto de ecuaciones de balance de potencia. Para cada subsistema individualmente, el principio de conservación de la energía, implica el siguiente balance de potencias.

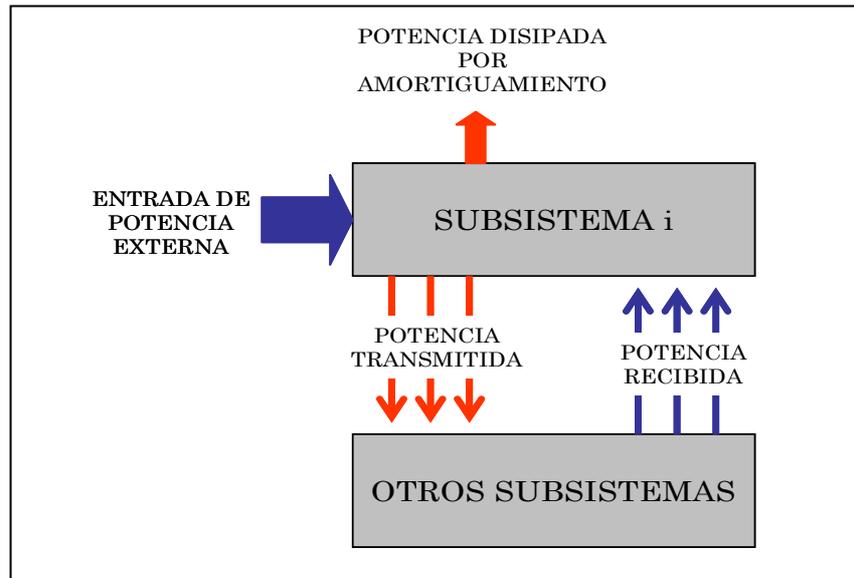


Figura 5.18.- Principio básico de balance de potencia en SEA.

Si la potencia de entrada desde fuentes externas puede ser determinada, y las distintas potencias transmitidas o disipadas, pueden expresarse en función de la energía del subsistema, entonces se puede formular un conjunto de N ecuaciones de balance de potencia para las N energías desconocidas de cada uno de los subsistemas. Una vez obtenidas y formuladas las ecuaciones, la respuesta del sistema puede ser computada.

La potencia puede entrar a un subsistema desde una variedad amplia de fuentes externas, desde cargas mecánicas, como es el caso de una carga puntual, a fuerzas de presión aerodinámicas como es una onda acústica. La potencia de entrada, $P_{i,in}$, para el subsistema dependerá de la naturaleza de las cargas aplicadas y las propiedades del subsistema, pudiendo estimarse siempre a priori.

La potencia disipada, $P_{i,dis}$, se determina fácilmente si el amortiguamiento de un subsistema i se puede poner como un factor de pérdida, $P_{i,dis} = \omega \cdot \eta_i \cdot E_i$. Donde ω se interpreta como la frecuencia central de la banda considerada.

La potencia transmitida entre un subsistema i , acoplado físicamente a un subsistema j , y viceversa, producirá un flujo neto de energía entre ambos subsistemas. La determinación de este flujo de energía constituye la principal hipótesis SEA, que consiste en asumir que el flujo neto de energía entre dos subsistemas, P_{ij} , puede ser expresado según la ecuación (5.3).

$$P_{ij} = \omega \cdot \eta_{ij} \cdot n_i \left[\frac{E_i}{n_i} - \frac{E_j}{n_j} \right] \quad (5.3)$$

Siendo, n_i , la densidad modal del subsistema i , y η_{ij} una constante de proporcionalidad conocida como el factor de pérdida de acoplamiento. La ecuación (5.3) indica que el flujo neto de energía entre los subsistemas i y j es proporcional a la diferencia de energías por modo en cada subsistema. El número de modos resonantes en el subsistema i es $n_i \Delta\omega$, donde $\Delta\omega$ es el ancho de banda, y por lo tanto, la energía por modo entre subsistemas es proporcional a E_i/n_i . Para un subsistema i , la relación entre las potencias de entrada, disipada y transmitida con un subsistema j , se puede expresar de la siguiente forma,

$$P_{i,in} = \omega \cdot \eta_i \cdot E_i + \Delta P_{ij} = \omega \cdot \eta_i \cdot E_i + \omega \cdot \eta_{ij} \cdot E_i - \omega \cdot \eta_{ji} \cdot E_j$$

Aplicando el principio de reciprocidad respecto de la energía transmitida entre dos subsistemas, $\eta_{ij} \cdot n_i = \eta_{ji} \cdot n_j$, se obtiene,

$$P_{i,in} = \omega \cdot \eta_i \cdot E_i + \omega \cdot \eta_{ij} \cdot E_i \frac{n_i}{n_i} - \omega \cdot \eta_{ij} \cdot E_j \frac{n_i}{n_j} = \omega \cdot \eta_i \cdot E_i + \omega \cdot \eta_{ij} \cdot n_i \left(\frac{E_i}{n_i} - \frac{E_j}{n_j} \right) \quad (5.4)$$

La justificación de la ecuación (5.4) está siendo ampliamente investigada con el fin de delimitar las condiciones bajo las que puede ser aplicada [4]. La ecuación es estrictamente cierta para el caso especial de solo dos osciladores acoplados y representa una aproximación para bastantes más casos. Generalmente, esto implica que el resultado será válido si la respuesta modal de los subsistemas es no correlacionada y dichos subsistemas están débilmente acoplados. Que las respuestas modales de los subsistemas sean o no correlacionadas depende fundamentalmente de la naturaleza de la excitación. Si la excitación es aleatoria, la respuesta previsible es de baja correlación, y si la excitación es puntual, la correlación de la respuesta puede ser alta. Además el concepto de débil acoplamiento es muy controvertido, ya que existen varias definiciones no equivalentes de este concepto. En general, los subsistemas pueden ser considerados débilmente acoplados si la excitación de un

subsistema provoca una respuesta relativamente baja en el otro. Para más de un subsistema j , la ecuación se puede poner de forma general como se expresa en (5.5).

$$P_{i,in} = \omega \cdot \eta_i \cdot E_i + \sum_{j=1}^N \omega \cdot \eta_{ij} \cdot n_i \left(\frac{E_i}{n_i} - \frac{E_j}{n_j} \right) \quad (5.5)$$

El sumatorio aparece porque el subsistema i puede estar acoplado a algunos o a todos los subsistemas. Si no existe acoplamiento para un subsistema particular j , entonces η_{ij} es igual a cero. La ecuación (5.5) es válida para cada subsistema i , y el conjunto completo de ecuaciones se puede escribir de forma matricial como se indica a continuación.

$$\left\{ \begin{array}{c} P_{1,in} \\ P_{2,in} \\ \vdots \\ P_{N,in} \end{array} \right\} = \omega \left[\begin{array}{cccc} \eta_{1 \cdot n_1} + \sum_{j \neq 1}^N n_{1j} \cdot n_1 & -\eta_{12} \cdot n_1 & \cdot & \cdot & -\eta_{1N} \cdot n_1 \\ -\eta_{21} \cdot n_2 & \eta_{2 \cdot n_2} + \sum_{j \neq 2}^N n_{2j} \cdot n_2 & \cdot & \cdot & -\eta_{2N} \cdot n_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\eta_{N1} \cdot n_N & -\eta_{N2} \cdot n_N & \cdot & \cdot & \eta_{N \cdot n_N} + \sum_{j \neq N}^N n_{Nj} \cdot n_N \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \frac{E_1}{n_1} \\ \frac{E_2}{n_2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{E_N}{n_N} \end{array} \right\} \quad (5.6)$$

Como ya se ha comentado, los factores de pérdida de acoplamiento satisfacen el principio de reciprocidad, $\eta_{ij} \cdot n_i = \eta_{ji} \cdot n_j$, y esto implica que la matriz es simétrica. Resumiendo, de la ecuación matricial se deduce que los datos de entrada necesarios para aplicar el método SEA, son:

- Las entradas de potencia, $P_{i,in}$.
- Los factores de pérdida por amortiguamiento de cada subsistema, η_i .
- Los factores de pérdida por acoplamiento entre subsistemas, η_{ij} .
- La densidad modal, n_i .
- Las bandas centrales de cada frecuencia objeto de análisis, ω .

La resolución del sistema matricial (5.6), tiene como consecuencia la obtención de las energías de todos los subsistemas, pudiéndose estimar la velocidad o la presión sonora media al cuadrado, a partir de las energías calculadas al determinar la matriz inversa de los factores de pérdida (5.7).

$$\{E\} = \frac{1}{\omega} [\eta]^{-1} \{P_{in}\} \quad (5.7)$$

Las energías de los subsistemas obtenidas por la ecuación (5.7) representan los valores promediados espacialmente, en cada frecuencia y de conjunto. Aunque los valores promedio proporcionan una información muy valiosa sobre la respuesta del sistema, el conocimiento de la distribución estadística de los valores de energía permitiría determinar la varianza. Este parámetro estadístico permitiría valorar el ajuste de los resultados. De hecho, los valores medios obtenidos por SEA con una varianza grande se consideran poco satisfactorios y viceversa. Actualmente se investiga para obtener métodos de estimación de la varianza [2]. No obstante, se sabe que un parámetro clave para obtener una varianza razonablemente baja es el solapamiento modal, M . Para un subsistema simple que sea excitado por cargas puntuales, el valor de la desviación estándar de la energía con respecto a su valor medio, tiende a ser inversamente proporcional a la raíz cuadrada del factor de solapamiento modal. Por consiguiente, la varianza es baja cuando el solapamiento modal es alto.

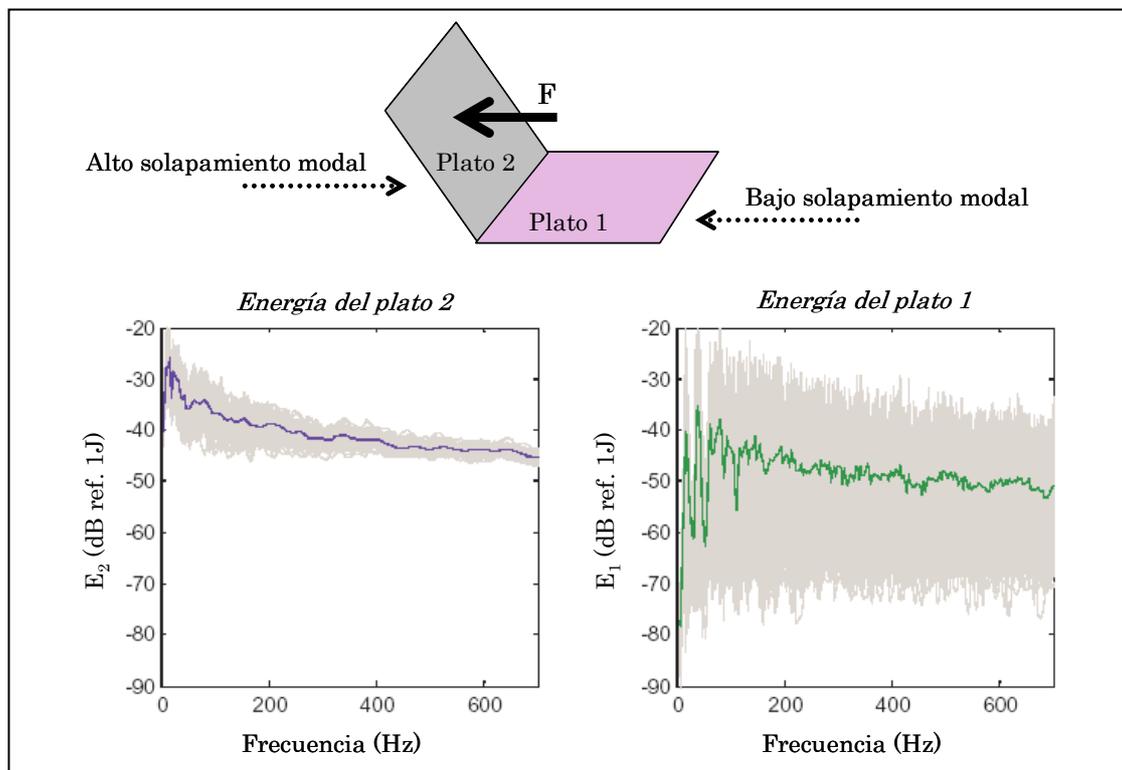


Figura 5.19.- El plato 1 con bajo solapamiento modal tiene varianza alta y la energía media se predice con peor ajuste. Por el contrario, el plato 2 tiene alto solapamiento modal y su varianza toma un valor pequeño, la predicción de la energía media es entonces más precisa.

5.3.11.-Modelización con AutoSEA2 LT

De los diversos programas comerciales que aplican el método de análisis estadístico de energía SEA, el software AutoSEA2 es quizás el más conocido. En este epígrafe se describe el modelo desarrollado con el auxilio de dicho software comercial, así como un breve resumen de su capacidad de análisis y sus limitaciones. La versión del software utilizado es AutoSEA2 LT (2006), que utiliza el mismo motor de cálculo que la versión AutoSEA2 al que se le ha reducido una serie de funcionalidades que facilitan su manejo. En general, la aplicación de autoSEA2 permite estudiar sistemas complejos de ámbito industrial, donde se puede predecir con una cierta precisión, la propagación de la vibración en una estructura y su radiación en forma de ruido, o bien, la propagación del ruido en el interior de un recinto. El software también permite realizar tratamientos sobre los distintos elementos del modelo con el fin de obtener mejoras en su comportamiento vibroacústico.

El programa posee dos pantallas principales que ayudan a modelizar la estructura: Browser window y 3D window. Con la ventana Browser se accede a la base de datos donde se determinan, o definen, las características de los materiales utilizados en los elementos del modelo, las propiedades físicas de dichos elementos, los tratamientos de control de ruido, las zonas de acoplamiento o juntas entre elementos, las cargas y restricciones, etc. Esta pantalla permite visualizar con una estructura de árbol todos los aspectos que definen las características del sistema en su conjunto. Además, en la ventana Browser se definen los nodos del sistema, bien importados desde un software de elementos finitos o introducidos manualmente. Utilizando la ventana Browser se puede hacer invisible un elemento concreto para facilitar la accesibilidad a cualquiera de ellos.

La ventana 3D visualiza de forma gráfica todos los elementos que intervienen en el proceso de modelado, que pueden ser: vigas, platos, casquetes de curvatura simple, cilindros, casquetes de doble curvatura, cavidades acústicas, conductos acústicos y espacios fluidos de propagación semi-infinitos. AutoSEA2 LT posee un protocolo propio de definición de estos elementos a partir de los nodos que delimitan la geometría del sistema. La conexión entre componentes se realiza de forma automática utilizando la función *autoconnect*, aunque el acoplamiento entre elementos puede modificarse a conveniencia si no se ha realizado correctamente.

En la figura 5.20, se muestran las dos pantallas principales de AutoSEA2 LT, todo el proceso de modelización de una estructura concreta se puede hacer desde estas dos pantallas.

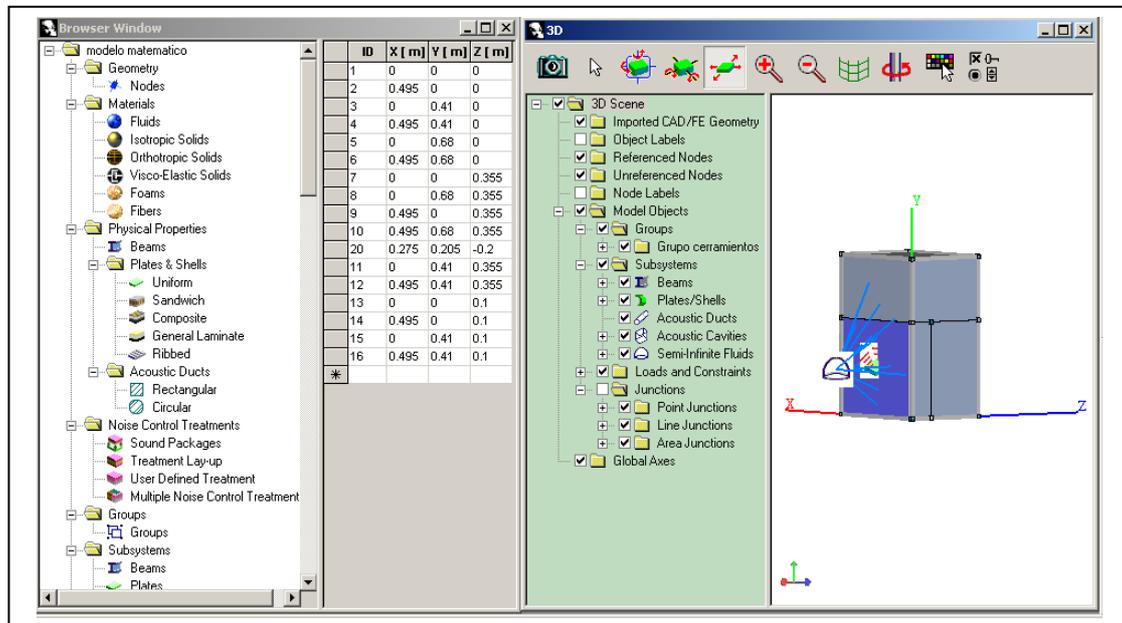


Figura 5.20. - En la figura se puede apreciar a la izquierda la Browser Window donde se define las características de los elementos del modelo, y a la derecha, la 3D window donde se visualiza el modelo de forma gráfica.

En la ventana 3D se puede ver la caja de ensayo modelizada. Está compuesta por: 13 vigas que forman el marco de la caja, 12 platos denominados cerramientos más un plato denominado probeta, 3 cavidades acústicas y un espacio aéreo de propagación semi-infinito. El sistema es excitado mediante un campo sonoro difuso colocado en una de las cavidades, y se ha determinado el nivel de presión sonora a la distancia a la que se han realizado las medidas experimentales, ya que, el nivel de presión en campo libre se corresponde con el nivel de intensidad. El campo sonoro, que excita el sistema, posee el espectro de ruido rosa reproducido realmente por la fuente sonora.

Los elementos denominados cerramientos están definidos, cada uno de ellos con sus dimensiones reales, como una chapa de acero de 6 mm a la que se le ha añadido un tratamiento acústico con un material absorbente de poliuretano con base poliéster de 40 milímetros de espesor. El tratamiento se aplica por la cara interior de cada superficie, como se ha realizado realmente en la caja de ensayo. Por otra parte, el plato denominado probeta, que es el que recibe directamente la energía de la

fuente sonora, se considera de igual características que el resto de los cerramientos pero sin tratamiento acústico. Las características más complejas de introducir son las relacionadas con los factores de pérdida por amortiguamiento o por acoplamiento. En el modelo generado se ha tenido en cuenta la base de datos que incorpora el propio programa para fijar estos factores y algunos parámetros obtenidos en el análisis modal. Una vez creado el modelo es necesario definir el ancho de banda a utilizar. El software permite seleccionar espectros en octava, 1/3 de octava o 1/n octava, evidentemente, cuanto más estrecho es el ancho de banda, mayores son los recursos necesarios para el procesado. También hay que definir la dirección de las deformaciones y el tipo de deformación: flexión, cortadura, compresión/tracción y torsión.

Antes de iniciarse el proceso de cálculo, el software compone la matriz definida en (5.6) y el vector de potencias de entrada. Obteniéndose en el proceso de resolución, el vector de energías de cada elemento. La velocidad de vibración media al cuadrado o la presión sonora media al cuadrado, se obtienen de la energía calculada de cada subsistema y en cada caso. El software AutoSEA2 también muestra los valores característicos del análisis SEA, como son: la densidad y el solapamiento modal y el número de modos en banda entre otros. Se pueden obtener espectros de energía absoluta o modal para cada elemento que forma parte del modelo. La representación de la potencia de entrada o las potencias de las pérdidas de energía, también se pueden obtener de forma gráfica. En la figura 5.21 se muestra la energía modal de un plato, tal y como la representa AutoSEA2.

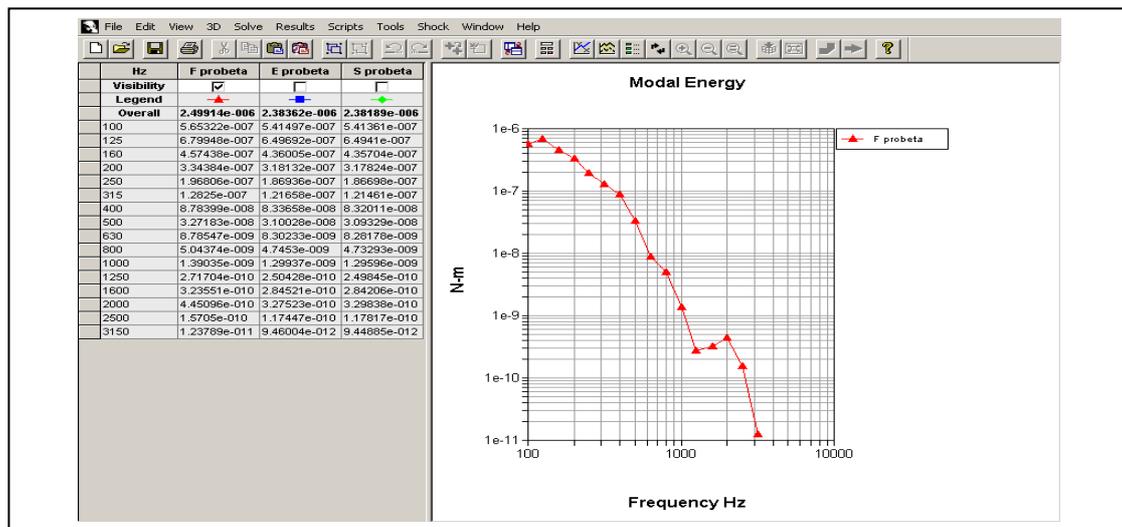


Figura 5.21.- El programa AutoSEA2 facilita simultáneamente los resultados de forma gráfica y tabulada.

Otras dos aplicaciones interesantes, a la hora de mostrar los resultados, son los termogramas y los gráficos de flujo de energía. El termograma se realiza sobre el modelo tridimensional y por frecuencia, dependiendo del parámetro que se seleccione se puede ver que elementos del modelo emiten mayor cantidad de energía. En la figura 5.22 se puede ver el termograma de un modelo a la frecuencia de 125 Hz.

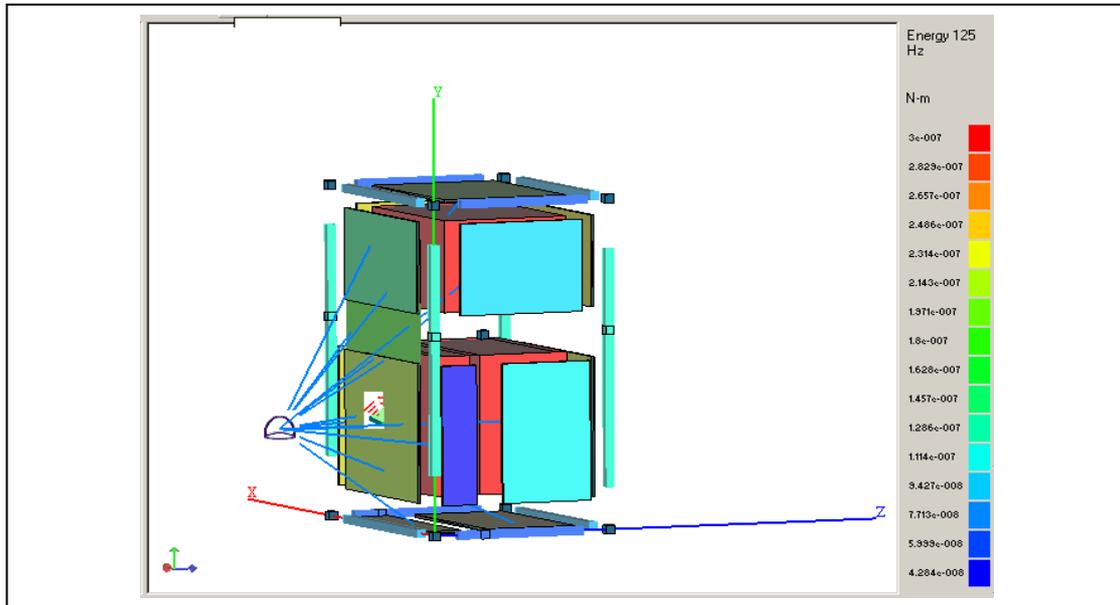


Figura 5.22. - El termograma muestra la energía aportada por cada componente del modelo con una escala de colores a la frecuencia de 125 Hz.

En los gráficos de flujo se aprecia como se transmite la energía a través del modelo a una frecuencia concreta. La representación se realiza por medio de vectores proporcionales a la magnitud de la energía que fluye, figura 5.23.

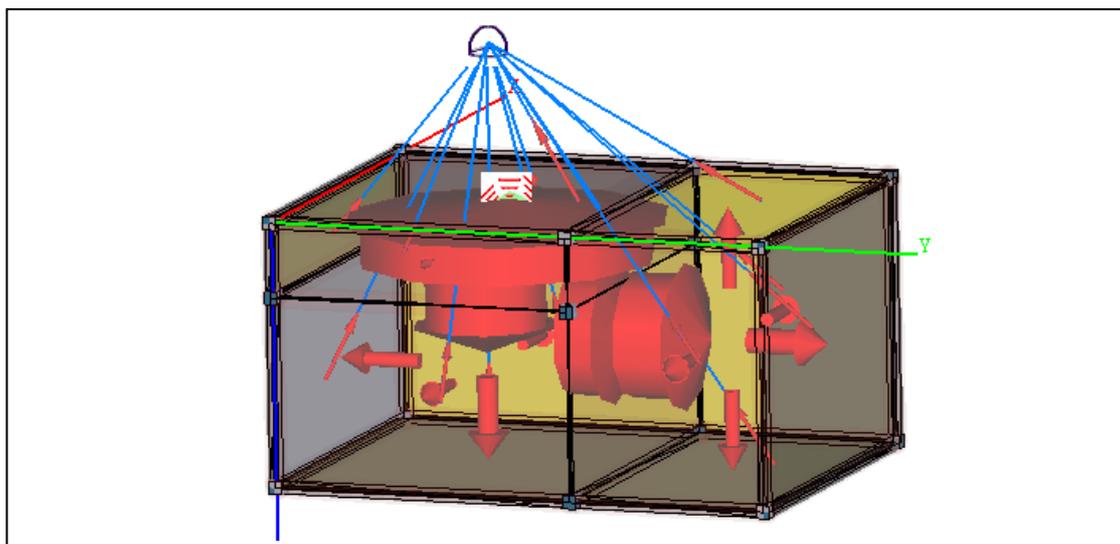


Figura 5.23. - Distribución gráfica del flujo de energía en el modelo a la frecuencia de 200 Hz.

Otra posibilidad útil del programa consiste en guardar el resultado de un modelo y compararlo, en la misma gráfica, con el resultado de una o varias modificaciones realizadas sobre el mismo modelo.

5.4.- Procedimientos de ensayo

Se han realizado dos procedimientos de ensayo, uno para determinar la intensidad sonora por medio del sonómetro 2260 Investigator de un conjunto de probetas de materiales aislantes y absorbentes; y otro, ideado para determinar el comportamiento modal de la probeta de acero y su relación con la energía sonora radiada por dicha probeta. Con el primer procedimiento se pretende determinar el índice de reducción sonora (R) de los distintos materiales objeto de ensayo, y con el segundo, apreciar como afectan las frecuencias naturales de un material rígido en su índice de reducción sonora. En los siguientes apartados se describe de forma secuencial cada uno de los procedimientos de ensayo.

5.4.1.-Procedimiento de ensayo para la determinación del Índice de Reducción Sonora R

La obtención del índice de reducción sonora (R) se ha realizado teniendo en cuenta una simplificación en la determinación de la energía sonora que atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo. Debido a que el ensayo se lleva a cabo midiendo la energía que fluye a través de la misma superficie, se puede plantear, a partir de la definición del índice de reducción sonora (R), lo siguiente:

$$R = 10 \times \log \frac{W_{in}}{W_{tr}} = 10 \times \log \frac{I_{in} \times S}{I_{tr} \times S}$$
$$R = 10 \times \log \frac{I_{in}}{I_{tr}} \quad (5.8)$$

De la ecuación (5.8) se deduce que el índice de reducción sonora (R) se puede determinar haciendo la diferencia entre el nivel de intensidad sonora incidente y el nivel de intensidad sonora transmitida. Por lo tanto, el ensayo consiste en medir en primer lugar la energía que emite la fuente sonora sin ninguna probeta interpuesta, es decir, fluyendo libremente dicha energía a través de la superficie abierta de la caja construida para hacer los ensayos. Posteriormente, se coloca el material a ensayar en el hueco de la caja y se mide nuevamente la energía transmitida. La

diferencia entre los niveles de intensidad medidos es el índice de reducción sonora (R). Aunque el ensayo parece sencillo, hay que tener en cuenta que las medidas de intensidad sonora deben ser validadas, ya que el campo sonoro que se genere en el interior del recinto puede ser muy reactivo, impidiendo que los resultados que se obtengan satisfagan los criterios de validación de las normas internacionales. Otros criterios importantes a cumplir son la repetibilidad de las medidas entre barridos y la detección de ruidos parásitos en el interior del recinto de ensayo ajenos a la fuente sonora.

La instrumentación se ha configurado para realizar cinco medidas de cada material objeto de ensayo; mas la combinación de la chapa de acero de 6 mm (M5) forrada por el interior con el material de poliuretano base poliéster (M6). También se ha determinado el nivel de intensidad de la fuente sonora sin materiales interpuestos. Por lo tanto, se realizan un total de ocho ensayos con cinco medidas por ensayo, es decir, cuarenta medidas.

En primer lugar, y con el fin de poder reproducir las medidas en cualquier momento, se ha calibrado el nivel de emisión de la fuente sonora en $119,7 \text{ dB} \pm 1 \text{ dB}$. El ruido de fondo se ha medido en cada sesión de medidas, siendo inferior a 45 dB en todos los ensayos. En la figura 5.24, se muestra la caja de ensayo donde se puede ver como se sujetan las probetas por medio de un marco de acero inoxidable.



Figura 5.24. - A la izquierda la caja de ensayo sin probeta y a la derecha con una probeta de lana de roca sujeta por medio de un marco de acero inoxidable.

Un factor importante a la hora de realizar los barridos es fijar la distancia entre la sonda de intensidad y las probetas. Para obtener una distancia adecuada, se

requiere la realización de varias medidas donde se puedan validar todos los parámetros de la norma UNE EN ISO 9614-3. Se comentó en el capítulo 3 que la distancia a la superficie física debe ser al menos de 200 mm. En el presente trabajo las medidas han sido realizadas a 270 mm.

En la figura 5.25 se pone de manifiesto de forma gráfica el procedimiento de barrido, teniendo en cuenta la distancia de separación con respecto a la caja de ensayo.

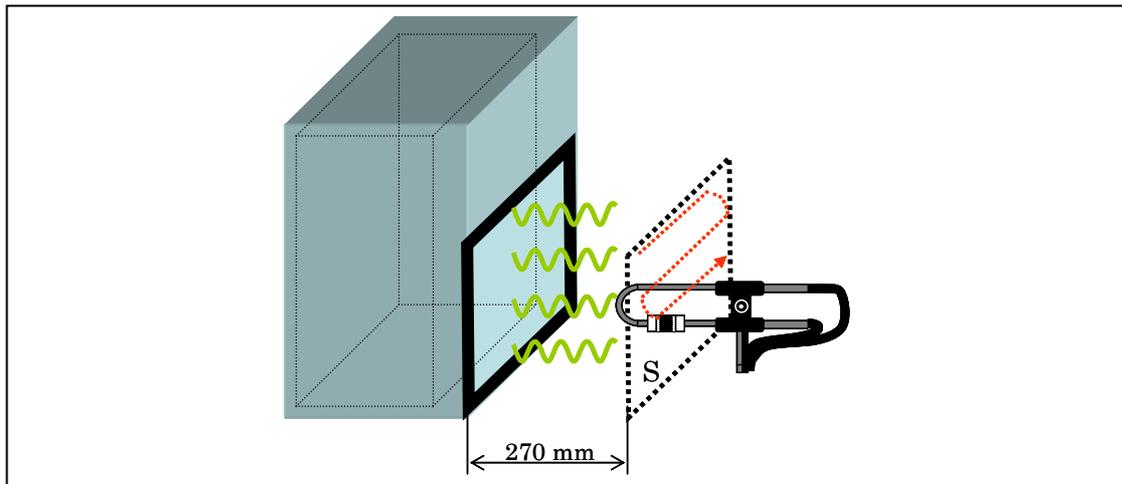


Figura 5.25. Representación gráfica del procedimiento de medida donde se puede apreciar la zona de barrido y la distancia entre la sonda y la caja de ensayo.

Una vez realizadas las medidas, los datos son volcados y post-procesados en el ancho de banda prefijado de 100 Hz a 3,15 kHz, para obtener los espectros del índice de reducción sonora (R), de la repetibilidad de los barridos y de la capacidad dinámica. Con el fin de comprobar, a alta y baja frecuencia, la incertidumbre generada en las medidas por una mala selección del espaciador, se han obtenido los espectros de intensidad en el rango de frecuencia de 25 Hz a 10 kHz.

5.4.2.-Procedimiento de ensayo para determinar los parámetros modales y su relación con la intensidad sonora radiada por la chapa de acero (M5)

Además de determinar la función de transferencia de la probeta de acero, excitando la estructura por medio del martillo diseñado a tal efecto, y midiendo su respuesta vibratoria, se ha medido la intensidad sonora radiada por la chapa al ser

excitada por medio del impacto del martillo. La medida simultánea de ambas funciones permite ver la relación existente entre el comportamiento vibratorio de la probeta y el campo sonoro que genera al vibrar. Realmente el objetivo de esta medida es hallar las frecuencias naturales de la probeta de acero y comprobar si el flujo de energía sonora difiere del comportamiento que rige la ley de masa.

Para la realización de las medidas se ha colocado la probeta sobre unos cojines neumáticos, cuya frecuencia natural se aleja suficientemente del rango de frecuencia en estudio, estando comprendida dicha frecuencia natural en el intervalo de los 9 Hz a los 12 Hz. En la probeta se han definido 36 puntos de medida, pegándose en cada uno de ellos con cianoacrilato, un clip de sujeción para el acelerómetro, figura 5.26.

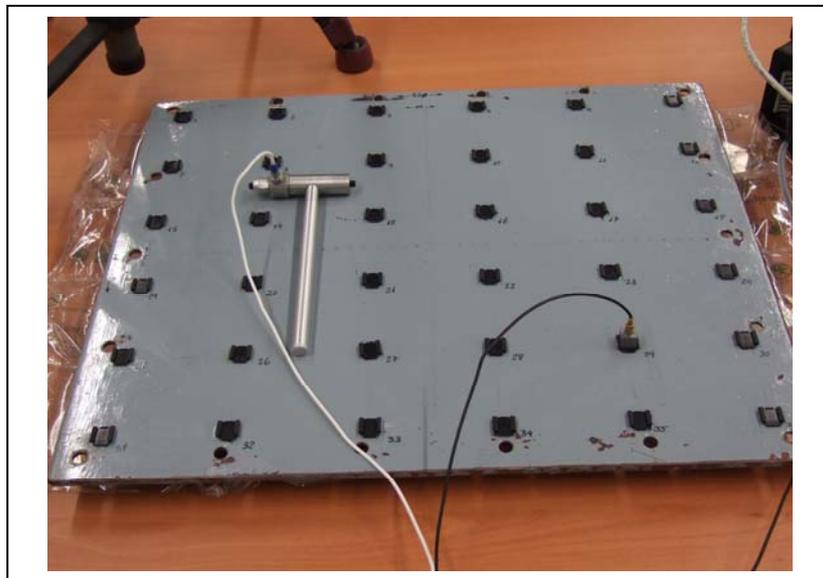


Figura 5.26. - Distribución de puntos de medida sobre la chapa de acero de 6 mm de espesor.

La instrumentación utilizada es el analizador multicanal PULSE, al que se le han conectado la sonda de intensidad, el martillo excitador con puntera de acero y el acelerómetro. En primer lugar se han configurado los distintos parámetros que caracterizan a los transductores de medida, donde se selecciona el tipo de transductor con su número de serie y su calibración, la sensibilidad, etc. Se definen todos como un grupo de señales para aplicarlos simultáneamente a un analizador FFT con una frecuencia máxima de análisis de 3,2 kHz. El ancho de banda es de 1 Hz ya que se han definido 3200 líneas espectrales. El promediado es exponencial de 10 medidas, la ventana temporal seleccionada es la Hanning. Con respecto a la

sonda de intensidad se ha introducido la longitud del separador que es de 18 mm, así como las condiciones de temperatura y presión atmosférica del recinto de ensayo. Otro aspecto importante a fijar, es el procesado que se va a realizar sobre las señales definiéndose las funciones específicas, en este caso: el autoespectro para la señal del acelerómetro, la amplitud y autoespectro de la señal del martillo excitador, la función de coherencia y de transferencia entre el acelerómetro y el martillo, y por último, el cálculo de la intensidad sonora que se realiza a partir de la obtención de la parte imaginaria del espectro cruzado de las dos señales de los micrófonos. En la figura 5.27 se puede ver las pantallas que definen el set-up de medida.

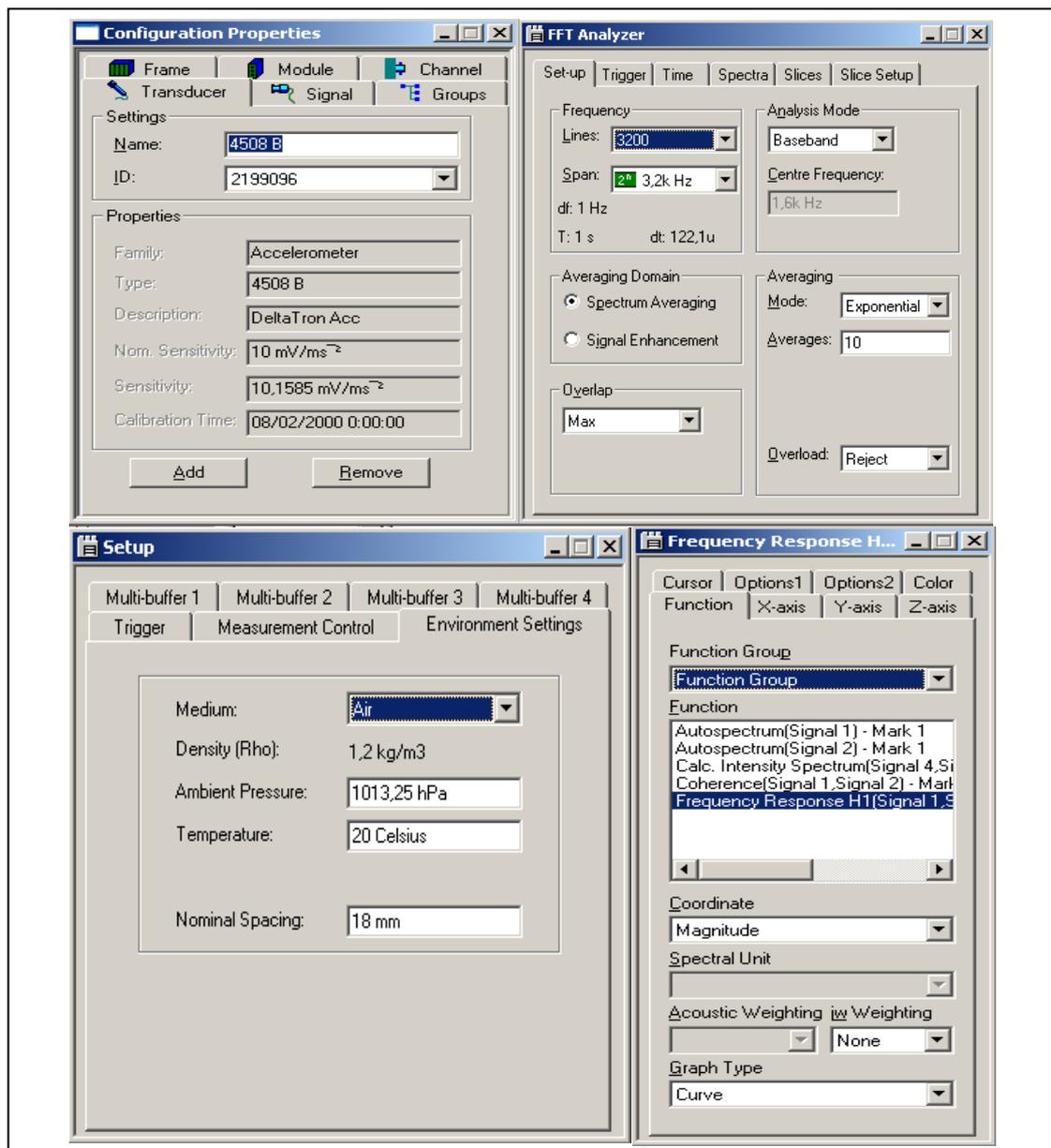


Figura 5.27.- Algunas de las pantallas de configuración del set-up de medida del analizador multicanal PULSE de B&K.

Una vez concluido el proyecto de medida se puede guardar para ser utilizado directamente cada vez que se desee. Las medidas se inician desde el control remoto de la sonda de intensidad, mostrado en la figura 5.12, y se concluyen también desde él. Si cada una de las medidas que se van realizando posee una función de coherencia buena, se guarda con un nombre en clave formado por cuatro dígitos. Los dos primeros identifican el punto de medida del acelerómetro, y los dos últimos el punto de excitación con el martillo.

Para obtener la matriz de transferencia, también conocida como Función de Respuesta en Frecuencia (FRF), basta con medir una fila y una columna de puntos de medida, en este caso se han medido los puntos de las dos diagonales. La disposición de la instrumentación de medida se muestra en la figura 5.28. La sonda de intensidad se ha soportado en un trípode a 445 mm de la probeta de acero, colocando el eje que une los micrófonos perpendicularmente como se aprecia en la figura 5.28. También se ensayó la excitación de la estructura con diversas punteras, obteniéndose resultados aceptables al golpear con la puntera de acero o con la de nailon, en este último caso, con la masa adicional montada en el martillo. Con respecto a la medida de la respuesta, el acelerómetro se dispuso sobre su clip de montaje, pegándose éste con cianoacrilato o sujetándose con cera. El resultado fue similar, fijándose entonces todas las bases de sujeción con pegamento.

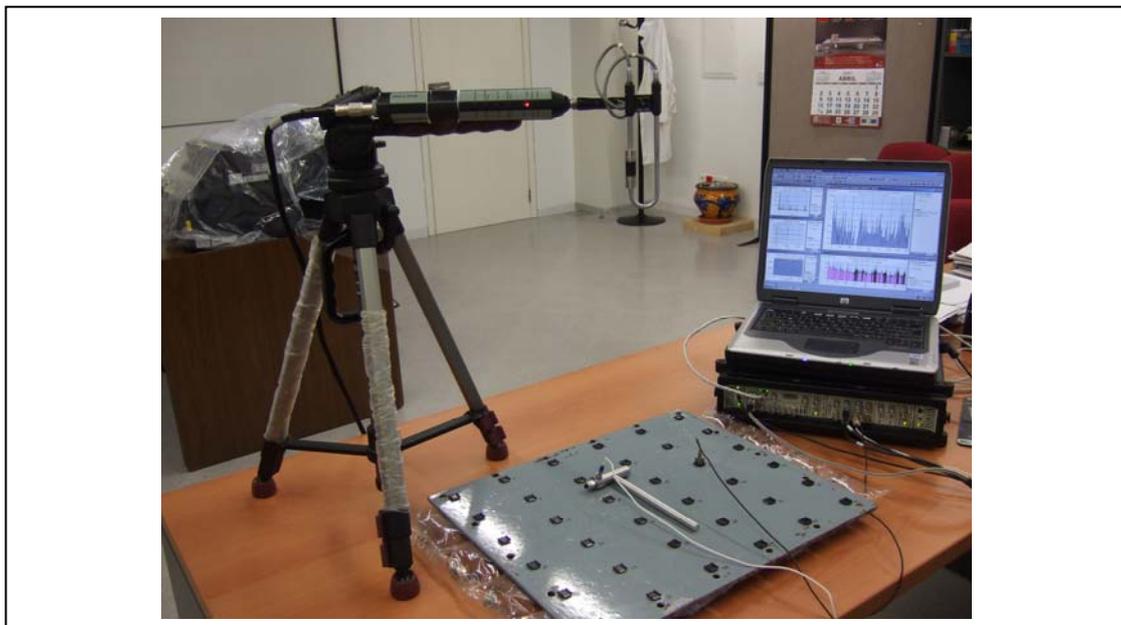


Figura 5.28.- Procedimiento de medida de la intensidad sonora y la velocidad de vibración de la probeta de acero al ser excitada con el martillo que lleva incorporado el sensor de fuerza.

Por último, las medidas obtenidas con PULSE han sido post-procesadas para poder comparar los resultados. Para ello, ha sido necesario volcar los datos de los gráficos y tratarlos para su decodificación. Una vez obtenida la información en unidades coherentes se ha realizado el post-procesado con una hoja de cálculo.

Capítulo 6

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1.- Introducción

En el presente capítulo se muestran los resultados de los parámetros que permiten validar las medidas como son la repetibilidad y la capacidad dinámica, así como el Índice de Reducción Sonora (R), de cada una de las probetas ensayadas. Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos se establece un procedimiento ordenado, donde se muestra en primer lugar la condición de repetibilidad de las medidas. A continuación se determinan las características del campo sonoro, verificándose el cumplimiento de las normas UNE EN ISO 9614 partes 2 y 3, fundamentalmente en lo relacionado con el índice de capacidad dinámica. Una vez demostrado el cumplimiento de la normativa de referencia se calcula el Índice de Reducción Sonora (R) de los materiales objeto de ensayo, discutiéndose su eficiencia como aislante acústico.

Además de las medidas orientadas a la determinación del Índice de Reducción Sonora (R), se aportan los resultados obtenidos aplicando técnicas de análisis modal sobre una probeta de acero de características similares a los cerramientos que conforman la caja de ensayo, discutiéndose su comportamiento vibroacústico.

Finalmente, se ha modelizado la estructura de la caja de ensayo por medio del software AUTOSEA2 LT basado en el método de Análisis Estadístico de Energía (SEA), comparándose los valores estimados con los medidos por la sonda de

intensidad sonora. La confrontación de los resultados obtenidos por medio del análisis modal y los resultados que aporta AUTOSEA2 LT, permite delimitar el rango de aplicación de este software comercial.

6.2.- Verificación de la repetibilidad de las medidas.

La repetibilidad de las medidas es la primera condición a verificar en cualquier experimento científico. Las medidas de la intensidad sonora deben ser repetitivas en el campo sonoro generado en un entorno físico sin acondicionamiento. Para comprobar el cumplimiento de la condición de repetibilidad se han realizado cinco medidas consecutivas con cada una de las probetas, comparándose gráficamente los resultados. En principio, esta verificación no está sujeta al cumplimiento de norma alguna que delimite la máxima desviación típica de los valores de intensidad sonora. No obstante, las condiciones de repetibilidad exigidas en la norma UNE EN ISO 9614 parte 2 y 3, son también comprobadas, garantizándose que las medidas pueden ser realizadas en condiciones similares en cualquier otro lugar.

6.2.1.-Repetibilidad de las medidas de la intensidad sonora

Como se determinó en el apartado 5.3.2, la longitud del separador de la sonda de intensidad sonora está calculada para validar las medidas en el ancho de banda comprendido entre 100 Hz y 3,15 kHz. Para frecuencias inferiores o superiores a las comprendidas en dicho intervalo, la incertidumbre de las medidas debe aumentar considerablemente, esperándose una mala repetibilidad de las medidas de la intensidad sonora. Por el contrario, en el intervalo objeto de estudio, la desviación típica de las medidas debe ser pequeña, siempre y cuando se mida en un entorno acústico poco reactivo.

Con el fin de mejorar las condiciones del entorno acústico se ha colocado un material absorbente en la pared situada frente a la fuente sonora. Se ha calibrado la fuente en un nivel de emisión sonora adecuado al nivel de ruido de fondo existente en el recinto, minimizándose también la reactividad del campo sonoro relacionado con la amplitud.

A continuación se muestran los espectros de intensidad sonora obtenidos para cada uno de los materiales, comparándose las cinco medidas realizadas con cada una

de las probetas. Se ha delimitado con línea discontinua roja, el intervalo de interés que es el comprendido entre 100 y 3,15 kHz. Para frecuencias superiores a 3,15 kHz se espera un error de medida debido a la aproximación por diferencias finitas. Para frecuencias inferiores a 100 Hz, el error previsto se debe al desajuste de fase entre los canales del equipo de medida. En ambos casos, además del error, cabe esperar una incertidumbre de medida elevada.

En la figura 6.1 se han representado los resultados obtenidos de las cinco medidas consecutivas realizadas en el ensayo de la probeta de polietileno de baja densidad (M1).

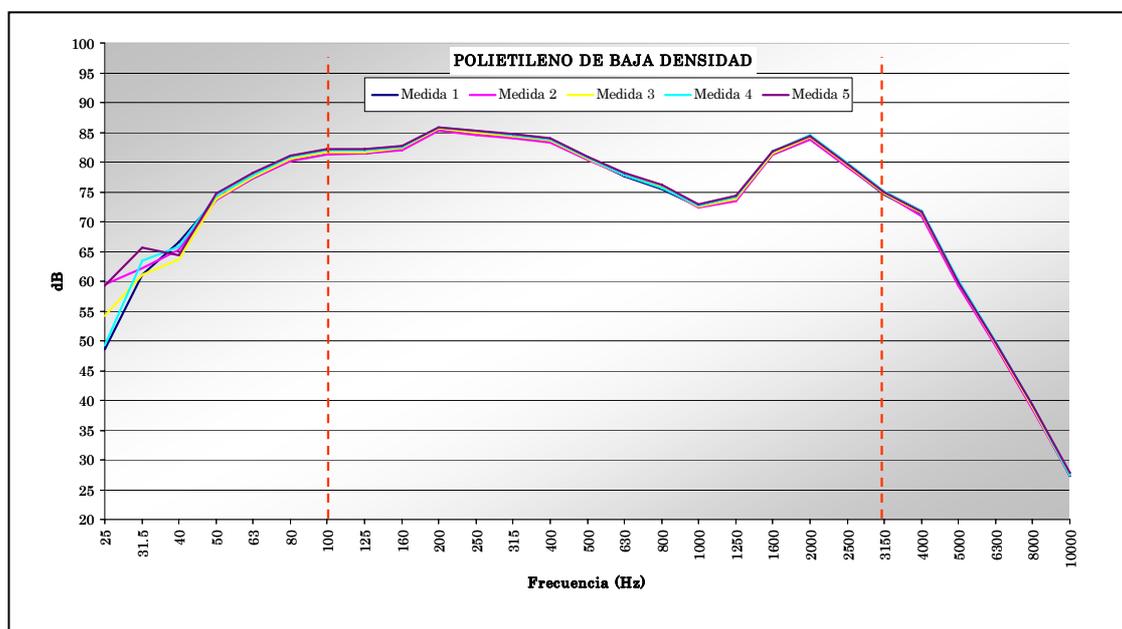


Figura 6.1.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta de polietileno (M1) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

Obsérvese que los espectros de intensidad sonora obtenidos prácticamente coinciden uno sobre otro en el intervalo de frecuencia previsto, entre 100 Hz y 3,15 kHz. Mientras que para frecuencias inferiores a 100 Hz se detecta una desviación mayor entre los valores de cada una de las medidas. Esto se debe, como ya se ha comentado, al desajuste en la medida de la fase de cada canal, siendo atribuible exclusivamente a la instrumentación de medida y al separador de micrófonos utilizado. Una valoración distinta merecen los valores de intensidad sonora obtenidos a frecuencias superiores a los 3,15 kHz, donde no se aprecian desviaciones significativas en este rango de frecuencia. Esta excepción fue estudiada por F. Jacobsen [43], concluyendo que el error cometido debido a la aproximación por

diferencias finitas se compensa con el error motivado por la influencia de la propia sonda en el campo sonoro. No obstante, en la normativa internacional no se contempla la posibilidad de extender el ancho de banda, por lo que esta circunstancia no se ha tenido en cuenta en la presente tesis.

En la figura 6.2 se muestran los resultados obtenidos para la probeta de caucho sintético (M2) cuyo comportamiento frente a la frecuencia es similar al de la probeta de polietileno (M1). A simple vista, se aprecia en el espectro que el nivel de energía que se trasmite a través de la probeta es sensiblemente inferior en el intervalo comprendido entre 1 kHz y 3,15 kHz.

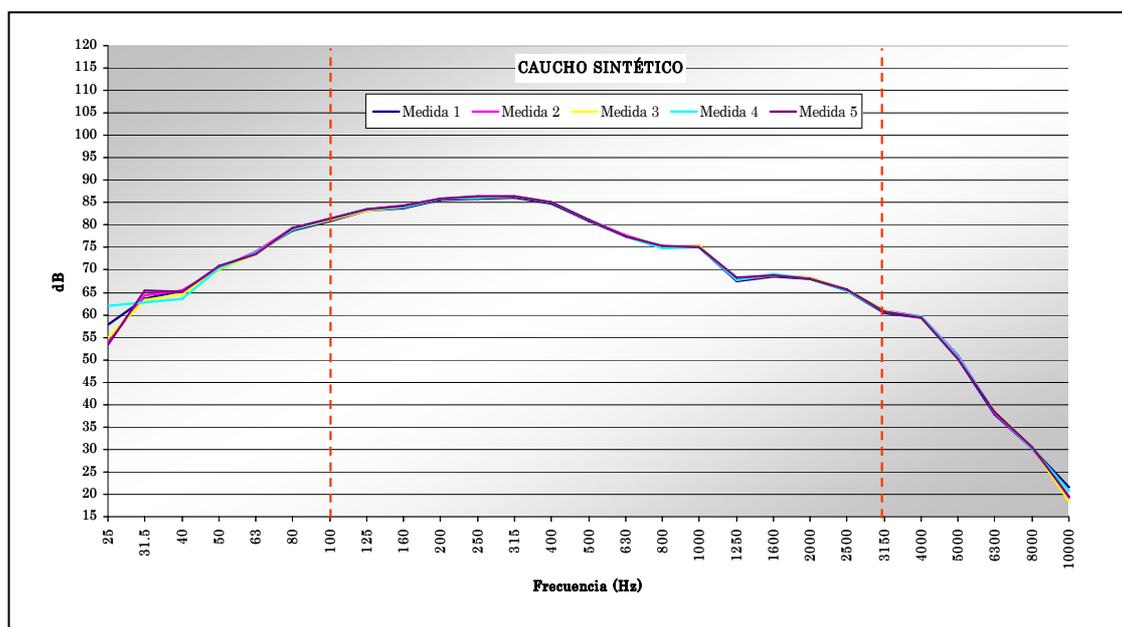


Figura 6.2.- Resultados de las cinco mediciones de intensidad sonora realizadas con una probeta de caucho sintético (M2) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

En las figuras 6.3 y 6.4 se ha representado el nivel de intensidad transmitido al otro lado de las probetas de lana de roca (M3 y M4) de igual densidad pero diferente acabado superficial. La probeta denominada (M4) ha sido revestida por una de sus caras con una capa de velo mineral y en principio no cabe esperar un comportamiento diferente entre las mismas. Si analizamos los espectros obtenidos, el comportamiento de las probetas de lana de roca es prácticamente idéntico. También se aprecia que a frecuencias medias y altas, la lana de roca transmite menos energía que las probetas de polietileno (M1) y la de caucho sintético (M2), siendo atribuible fundamentalmente a la diferencia de densidad superficial entre las probetas.

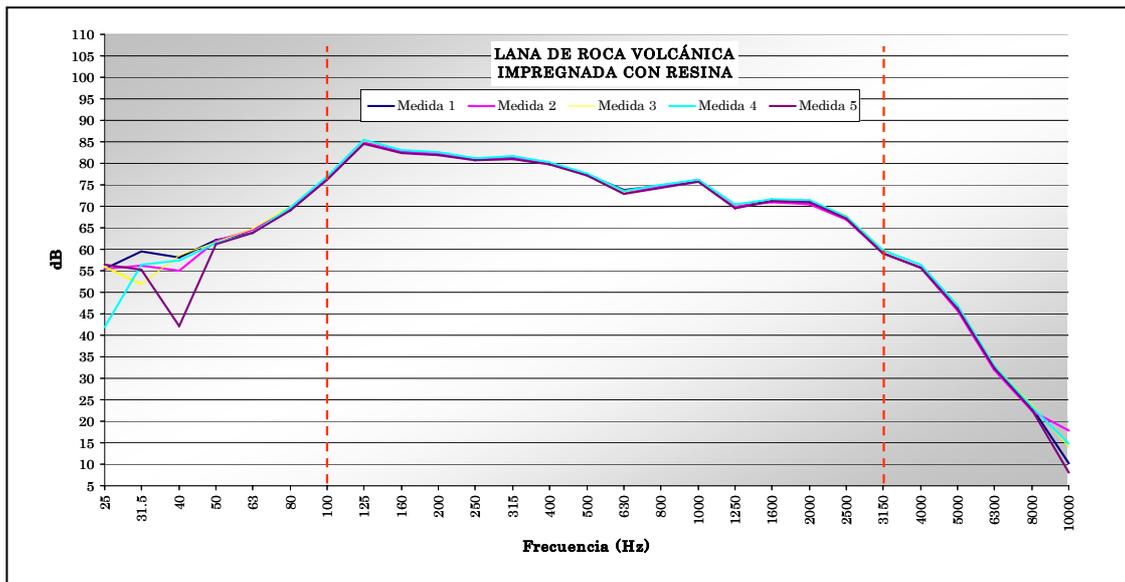


Figura 6.3.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta de roca volcánica impregnada con resina (M3) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

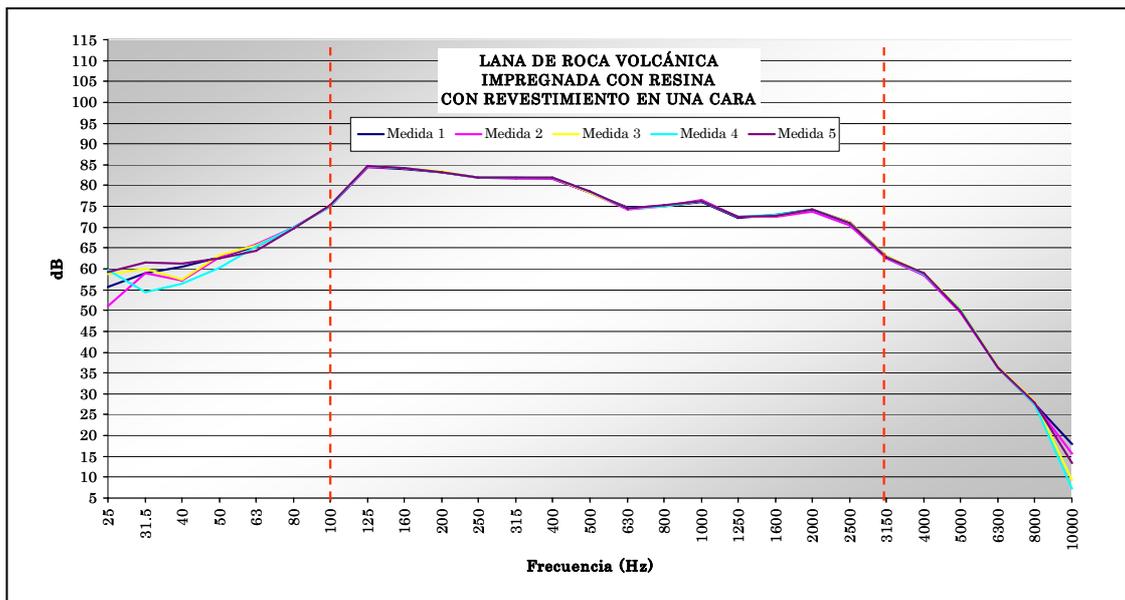


Figura 6.4.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta de roca volcánica impregnada con resina y con revestimiento por una cara (M4) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

También se han realizado medidas sobre una probeta de acero (M5) de 6 milímetros de espesor. La caja de ensayo está construida de este material, pudiéndose observar el bajo nivel de intensidad sonora transmitida. Éste buen comportamiento como aislante acústico se debe a que la probeta de acero posee la mayor densidad por unidad de superficie.

En la figura 6.5 se aprecia con nitidez la incertidumbre de medida a baja frecuencia originada por el desajuste de fase de la instrumentación. Por otra parte, existe un nivel de coincidencia elevado entre las cinco medidas realizadas sobre esta probeta en el ancho de banda de 100 Hz a 3,15 kHz.

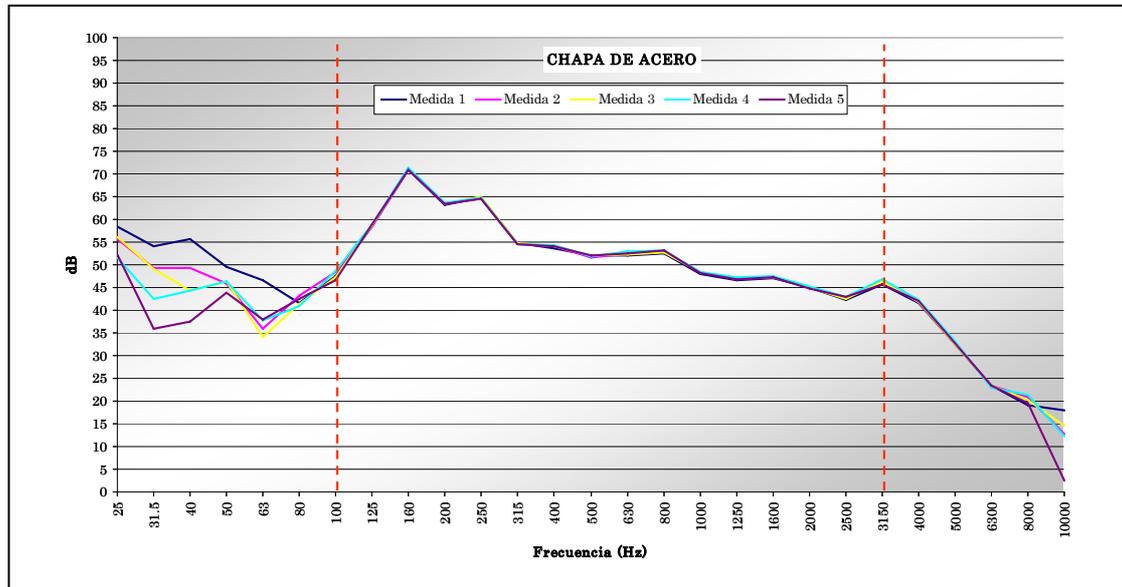


Figura 6.5.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta de chapa de acero de 6 mm de espesor (M5) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

En la figura 6.6 se muestra el nivel de la intensidad sonora transmitida cuando se coloca la probeta de poliuretano (M6) en la estructura de ensayo.

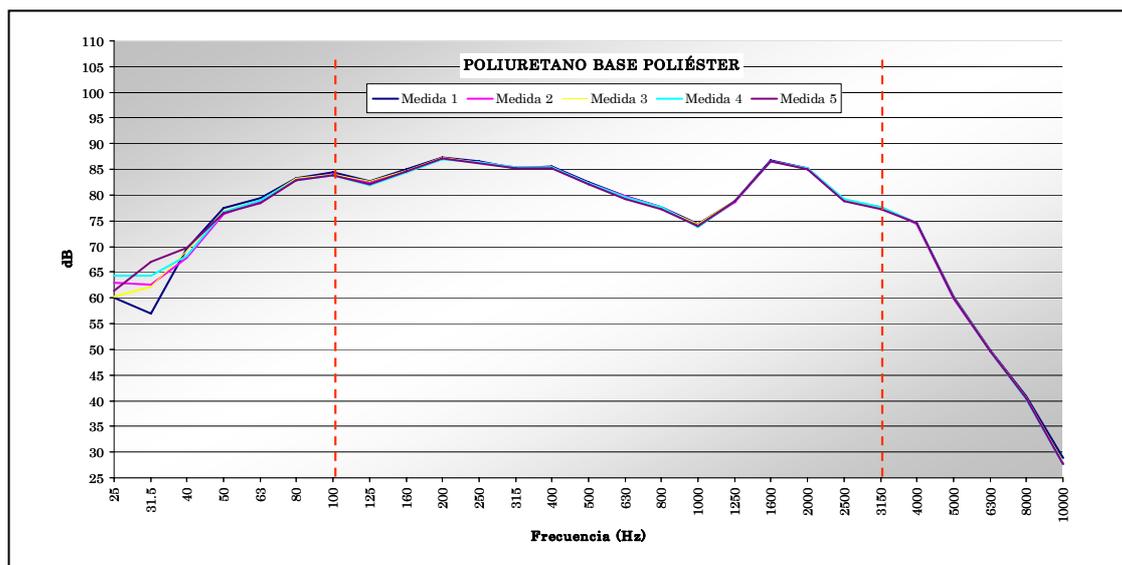


Figura 6.6.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta de poliuretano base poliéster (M6) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

Este material es el utilizado para el forrado interior de las superficies de chapa que constituyen el cerramiento de la caja. Es un material ligero y parecido en su comportamiento al polietileno de baja densidad (M1). Ambos materiales tienen un comportamiento deficiente como materiales aislantes acústicos, ya que dejan pasar un nivel de energía elevado.

El comportamiento de la probeta de chapa de acero (M5) con el poliuretano base poliéster (M6) incorporado, se muestra en la figura 6.7. La combinación de ambos materiales no sigue el principio de superposición. No obstante, se aprecia que el poliuretano (M6) mejora el comportamiento de la chapa de acero (M5) en las frecuencias altas.

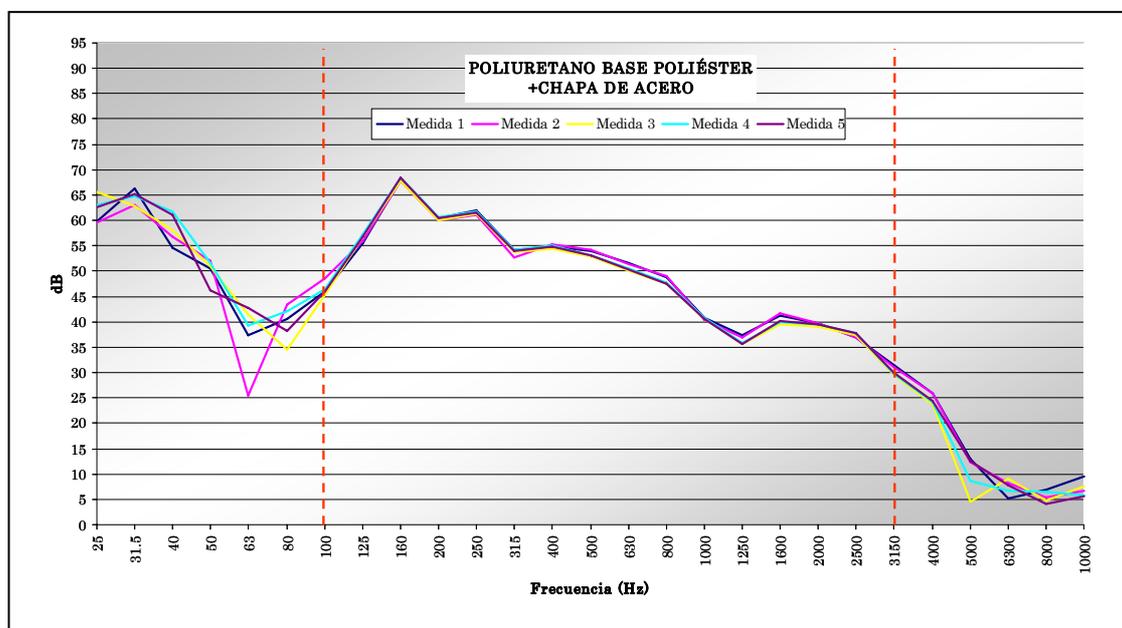


Figura 6.7.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con una probeta combinada de chapa de acero con poliuretano base poliéster (M5 + M6) en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

Otra peculiaridad que se aprecia, es que la incertidumbre de las medidas es evidente no solo a baja frecuencia, sino también a alta frecuencia. Ello es debido al bajo nivel de intensidad sonora que se transmite a través de la probeta combinada, pudiéndose ver afectada la medida por el ruido de fondo generado por fuentes externas. Sin embargo, en el ancho de banda para el que ha sido diseñado el separador (100 Hz a 3,15 kHz), las variaciones entre las cinco medidas realizadas son poco significativas. Los niveles de energía transmitidos a través de cada una de las probetas se han representado desde la figura 6.1 a la figura 6.6.

La energía incidente, es decir la generada por la fuente sonora sobre cada una de las probetas, también ha sido medida y representada de forma gráfica, figura 6.8. La señal de ruido patrón que alimenta la fuente sonora es de ruido rosa, teóricamente el nivel de energía debería permanecer constante frente a la frecuencia en bandas de ancho proporcional. En la práctica, un campo sonoro de ruido rosa es imposible de conseguir, debido a que el entorno físico interacciona modificando el espectro del campo acústico que se genera.

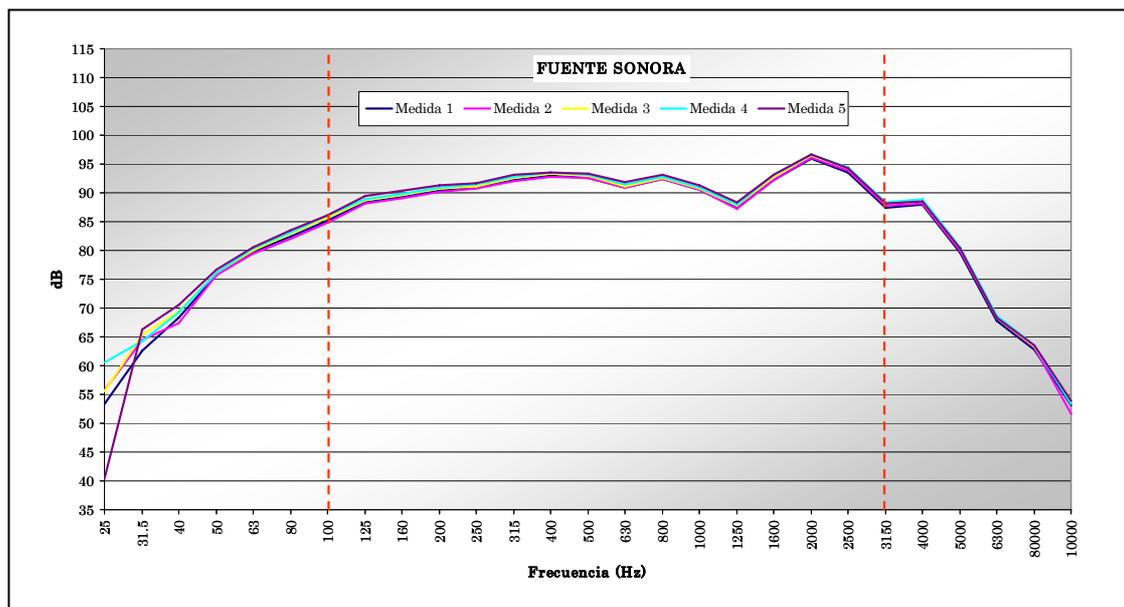


Figura 6.8.- Resultados de las cinco medidas de intensidad sonora realizadas con la fuente sonora sin probeta interpuesta en el intervalo comprendido entre 25 Hz y 10000 Hz.

La diferencia directa entre los niveles de intensidad sonora de la energía incidente y la transmitida a través de cualquiera de las probetas permite obtener el Índice de Reducción Sonora (R) de cada material.

6.2.2.-Validación de la repetibilidad según UNE EN ISO 9614

La verificación de la repetibilidad de las medidas debe valorarse según los criterios establecidos en las normas UNE EN ISO 9614 parte 2 y parte 3. Ambas partes de la norma se refieren al método por barrido. Fundamentalmente, la diferencia radica en el grado de precisión requerido. La parte 2 de la norma se utiliza cuando se requiere un grado de precisión de ingeniería (grado 2) o un grado de precisión de control (grado 3). Cuando se pretende obtener un grado de precisión mayor, es necesario aplicar la norma UNE EN ISO 9614-3 que es considerablemente

más restrictiva (grado 1). La repetibilidad se obtiene al comparar los valores del primer barrido, que se lleva a cabo muestreando horizontalmente la superficie de medida, con el segundo barrido que muestrea la misma superficie en dirección vertical. En las figuras siguientes se representan los valores de repetibilidad obtenidos en las cinco medidas realizadas con cada probeta. Los valores son comparados con los límites de desviación estándar especificados en las dos normas de referencia. Todos los materiales tienen al menos una medida de repetibilidad validada para los distintos grados de precisión requeridos en la UNE EN ISO 9614 partes 2 y 3. En la figura 6.9 se muestra la repetibilidad de las cinco medidas obtenidas con el polietileno de baja densidad (M1). Como se aprecia todas las medidas son validadas para el grado de ingeniería (UNE EN ISO 9614-2).

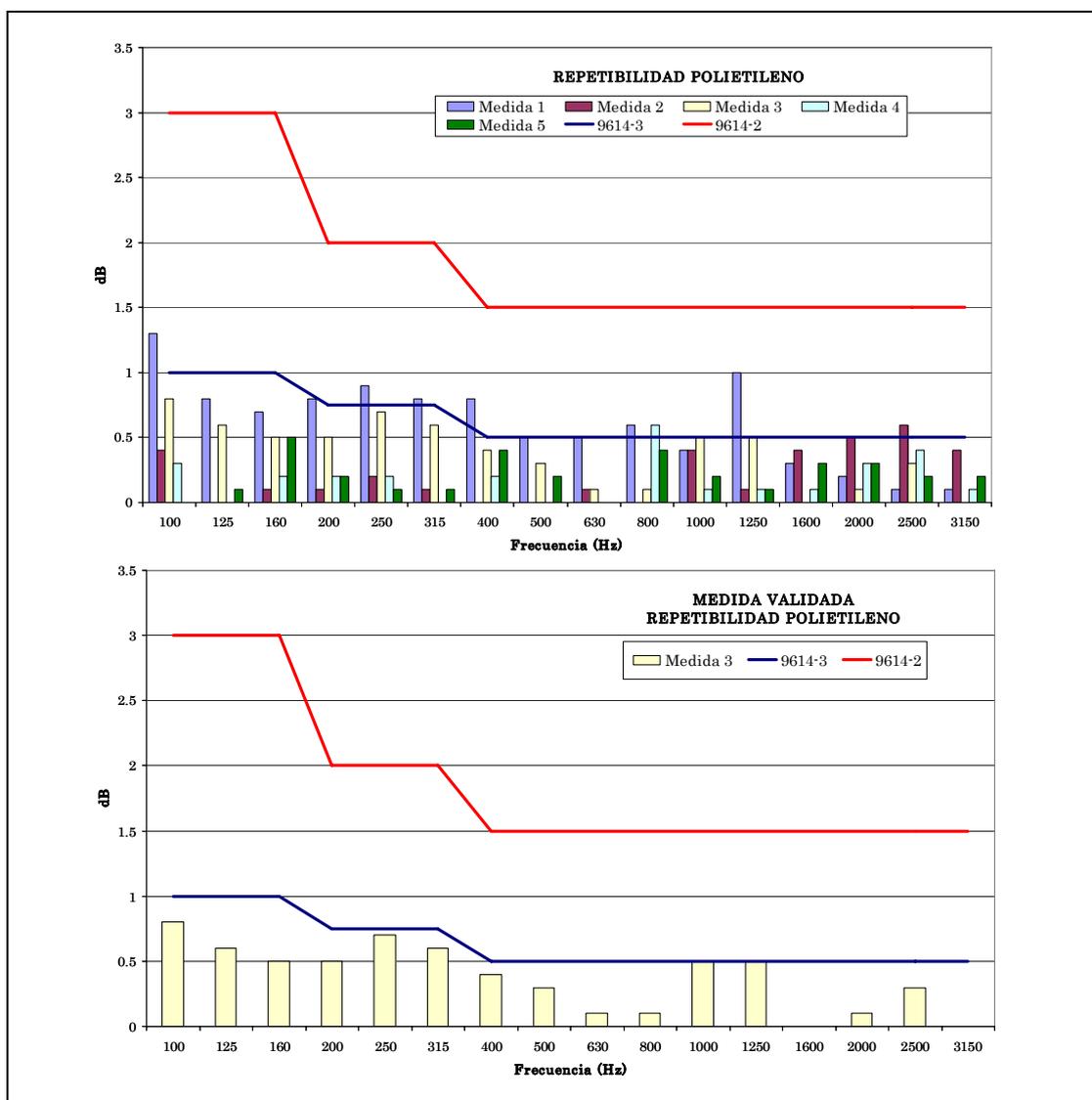


Figura 6.9.- En el gráfico superior se muestra la repetibilidad de las cinco medidas realizadas sobre la probeta de polietileno (M1), frente a los límites especificados en la normativa. En el gráfico inferior la repetibilidad de una medida que cumple con el límite de la UNE EN ISO 9614-3.

Como se puede ver en la gráfica superior de la figura 6.9, existen tres medidas de la repetibilidad que superan el límite más restrictivo, que son: la medida 1, la medida 2 y la medida 4. En la parte inferior, se ha representado la repetibilidad de la medida 3 que cumple con el límite más restrictivo para todas las frecuencias comprendidas entre los 100 Hz y los 3,15 kHz.

La repetibilidad obtenida en los ensayos realizados sobre la probeta de caucho sintético (M2) se puede observar en la figura 6.10. En este caso, de las cinco medidas realizadas, solamente la medida 4 cumple con el criterio más severo.

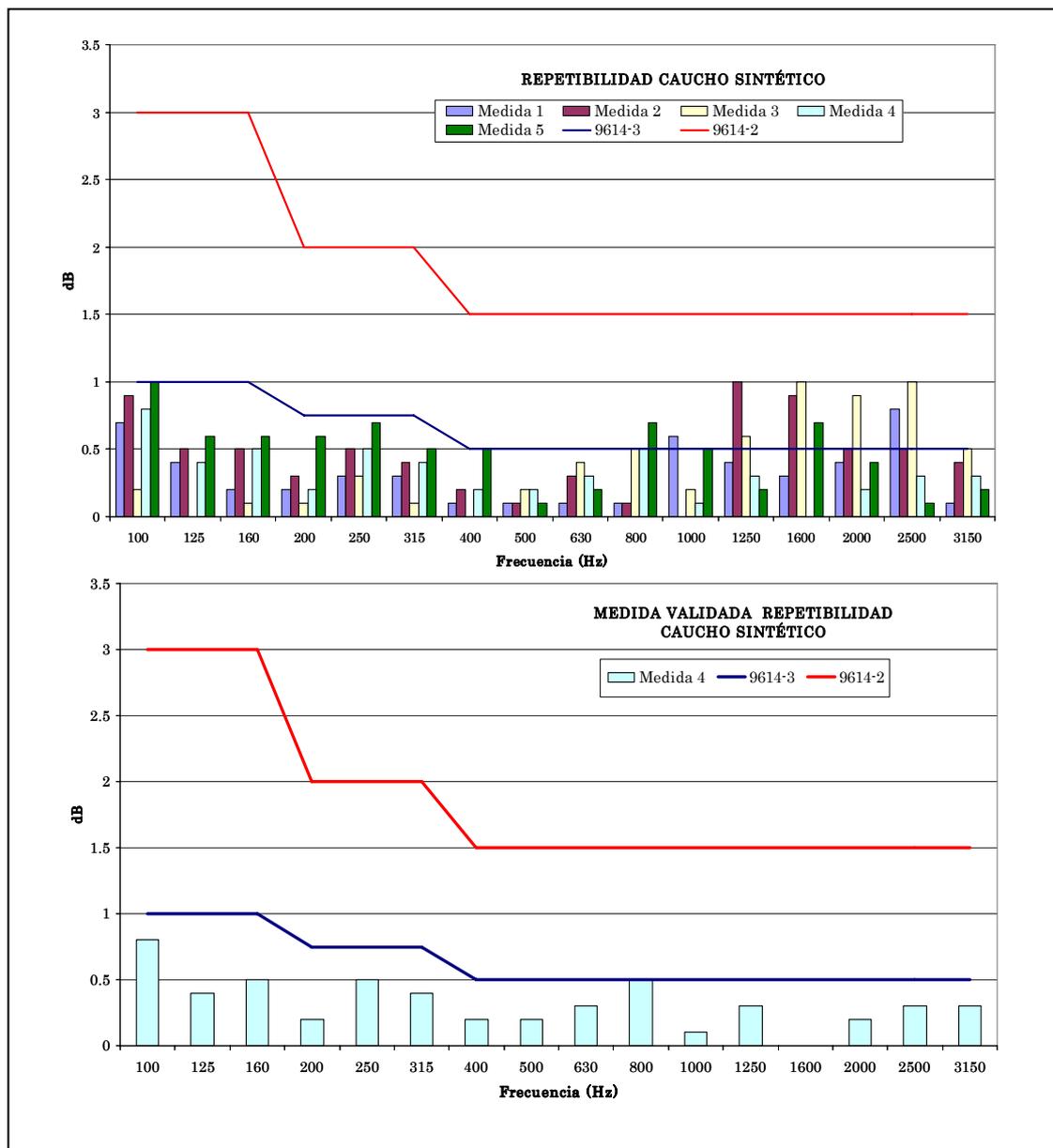


Figura 6.10.- En el gráfico superior se muestra la repetibilidad de las cinco medidas realizadas sobre la probeta de caucho sintético (M2), frente a los límites especificados en la normativa. En el gráfico inferior la repetibilidad de una medida que cumple con el límite de la UNE EN ISO 9614-3.

En las figuras 6.11 y 6.12 se pueden apreciar los valores de repetibilidad para las probetas de lana de roca. Concretamente, la figura 6.11 se corresponde con el ensayo realizado con la probeta de lana de roca sin revestimiento (M3), mientras que la figura 6.12 pertenece al ensayo de la probeta de lana de roca con revestimiento (M4).

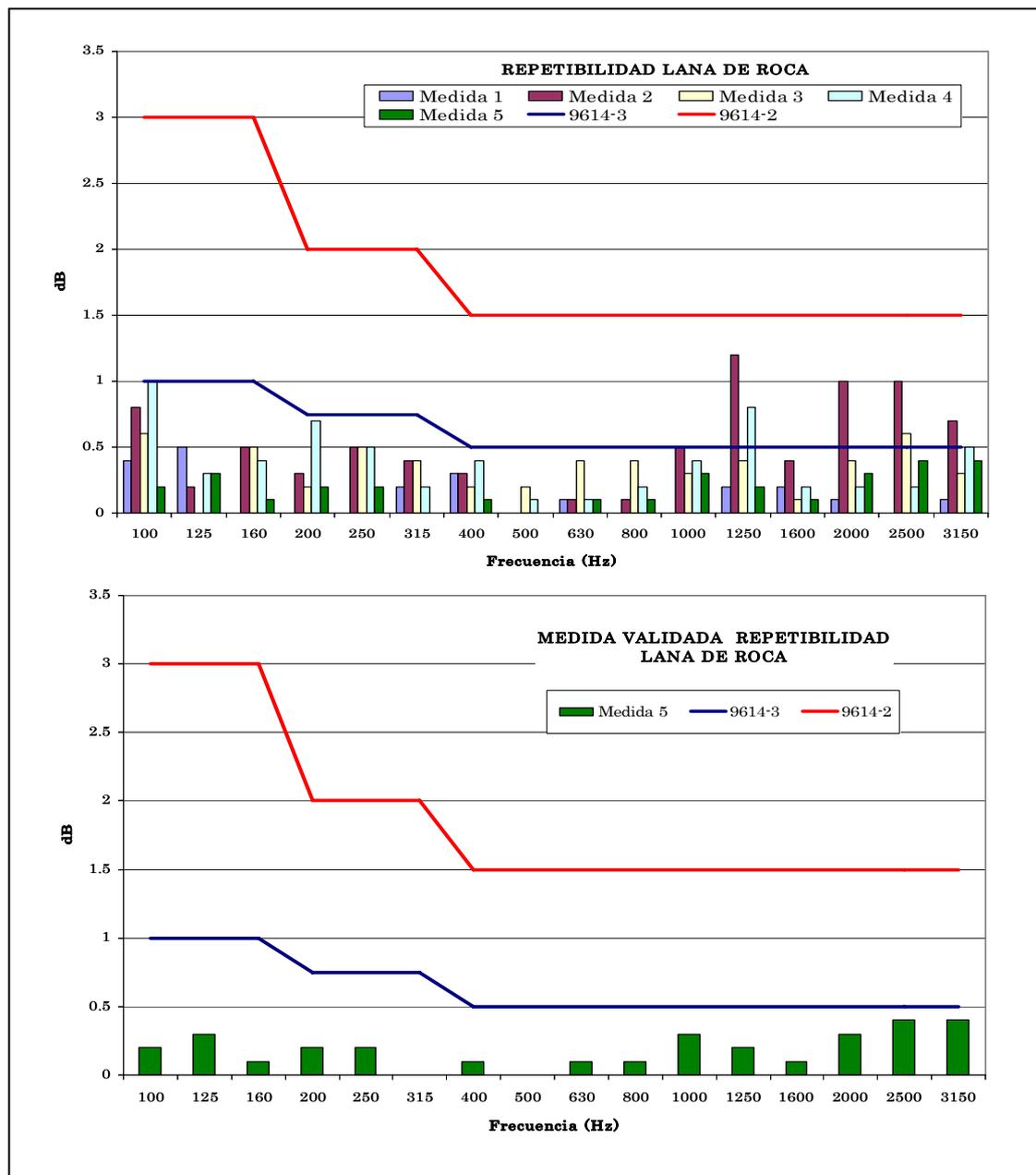


Figura 6.11.- Valores de la repetibilidad de la probeta de lana de roca (M3).

En ambos casos, varias medidas cumplen con el criterio de repetibilidad de la norma UNE EN ISO 9614-3. Aquellas que no lo hacen, tan solo incumplen el criterio en una o dos bandas de frecuencia en todo el ancho de banda.

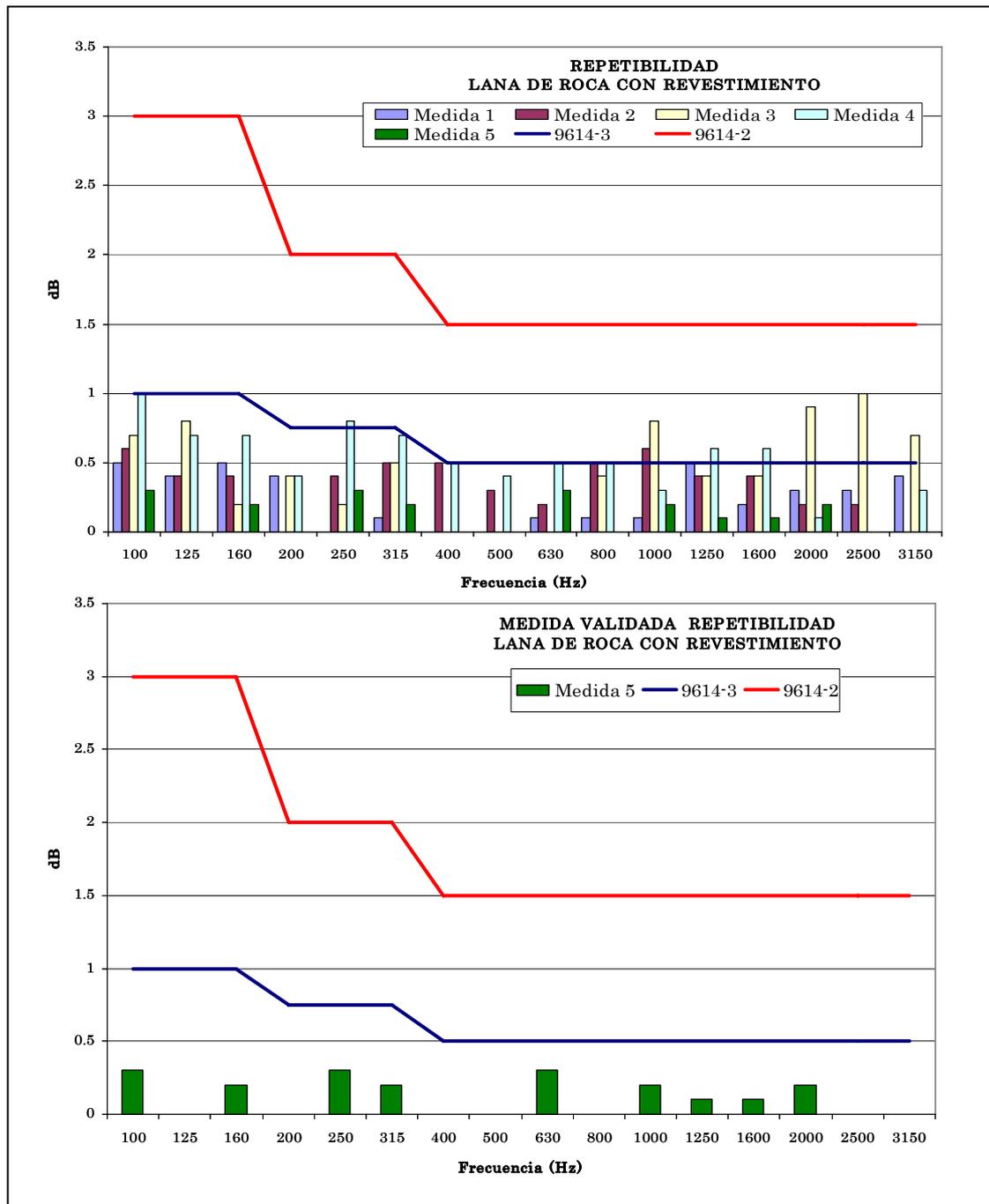


Figura 6.12.- Valores de la repetibilidad de la probeta de lana de roca con revestimiento (M4).

En la figura 6.13 se muestran los valores de repetibilidad obtenidos con la probeta de acero (M5). A diferencia de las probetas anteriores, la validación de la repetibilidad a la frecuencia de 100 Hz resulta más difícil, debido exclusivamente al incremento de la incertidumbre de medida para este tipo de material, véase la figura 6.5. En este caso, al transmitirse un flujo de energía acústica relativamente bajo, el error por desajuste de fase en la cadena de medida adquiere mayor importancia,

debido fundamentalmente a que el nivel de intensidad sonora obtenido y el nivel de ruido de fondo en el interior de la sala se encuentran relativamente próximos. Este problema es subsanable minimizando el ruido de fondo, siempre que sea posible.

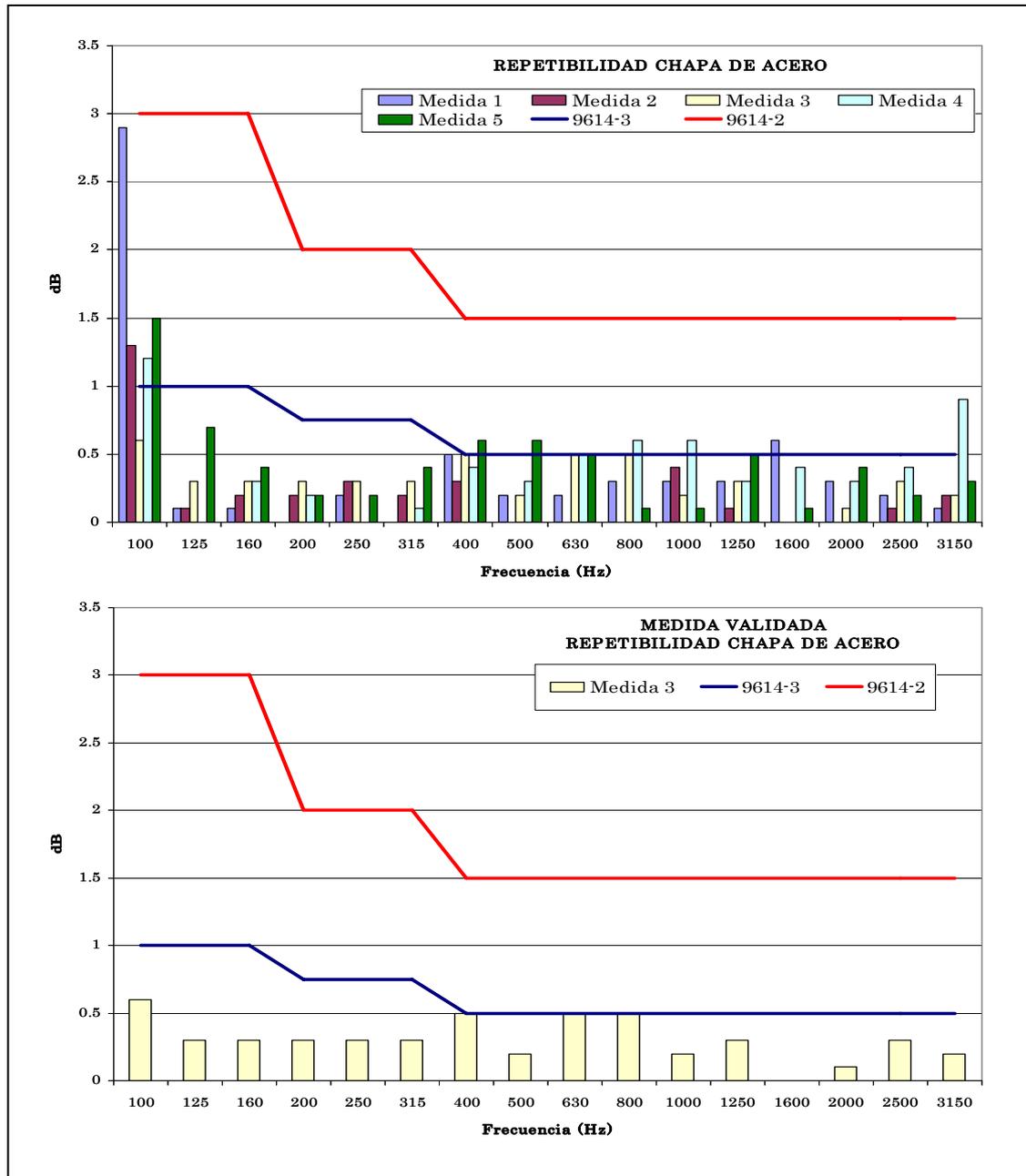


Figura 6.13.- Valores de la repetibilidad obtenida al ensayar la probeta de chapa de acero de 6 milímetros de espesor (M5).

En la figura 6.14 se muestran los resultados de la probeta de poliuretano (M6), siendo este material el que posee la densidad superficial más baja de todos los ensayados. La validación de la repetibilidad según la parte 3 de la norma UNE EN ISO 9614, solamente ha sido posible en una de las cinco medidas realizadas.

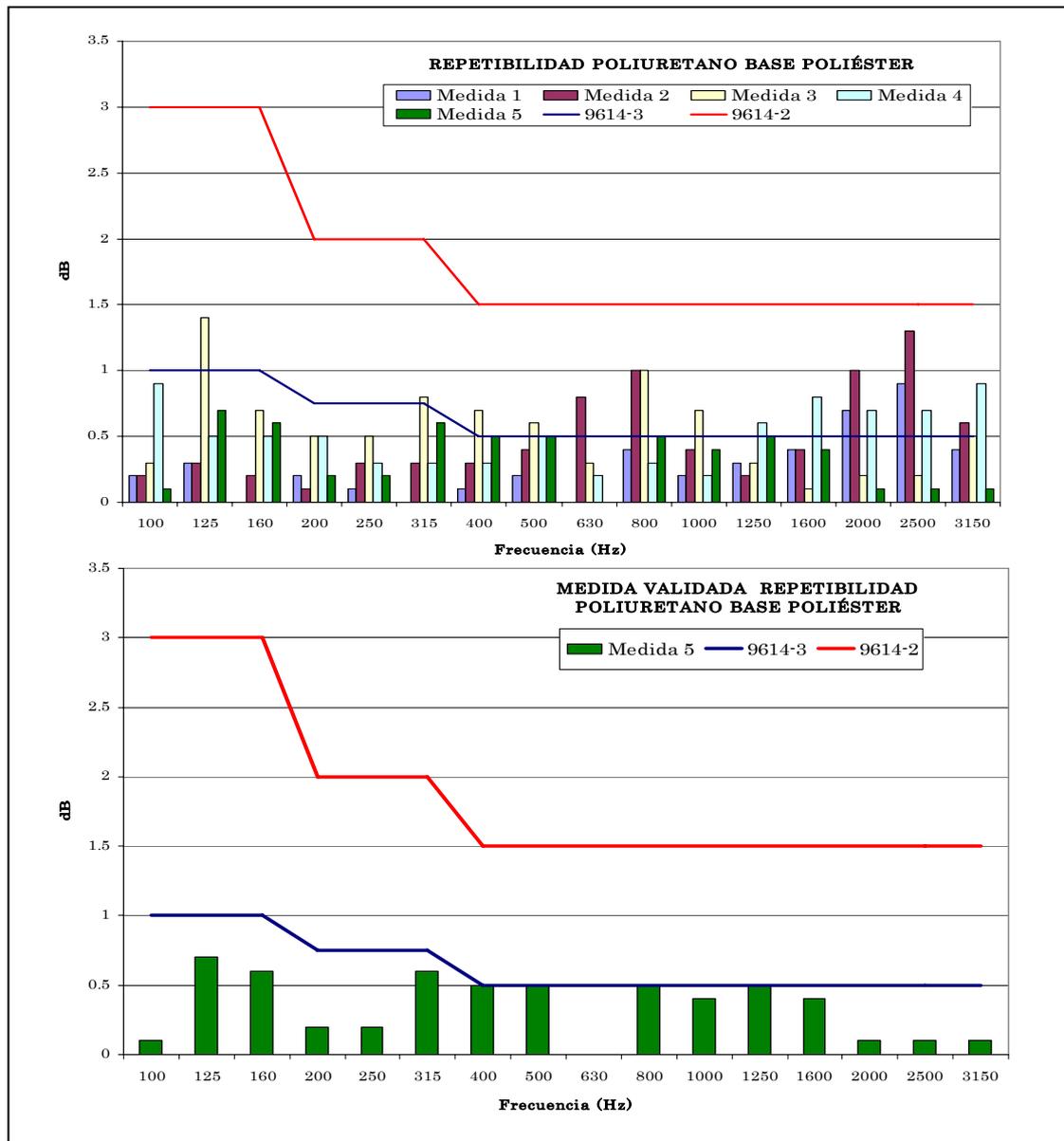


Figura 6.14.- Valores de la repetibilidad obtenidos con la probeta de poliuretano (M6).

En la figura 6.15 se aprecian los valores de repetibilidad de una probeta compuesta por la chapa de acero (M5) y la probeta de poliuretano (M6) que ha sido adherida interiormente a esta última. Con la combinación de los dos materiales se consigue el menor nivel de energía transmitido al otro lado de la probeta, aumentando la dificultad de validación de las medidas para el mayor grado de precisión. Al igual que sucede con la probeta de acero (M5), el bajo nivel de intensidad sonora transmitida a través de la probeta dificulta la validación de la repetibilidad según la parte 3 de la norma UNE EN ISO 9614. Siendo la causa del problema la incertidumbre de medida originada por el error de fase entre micrófonos.

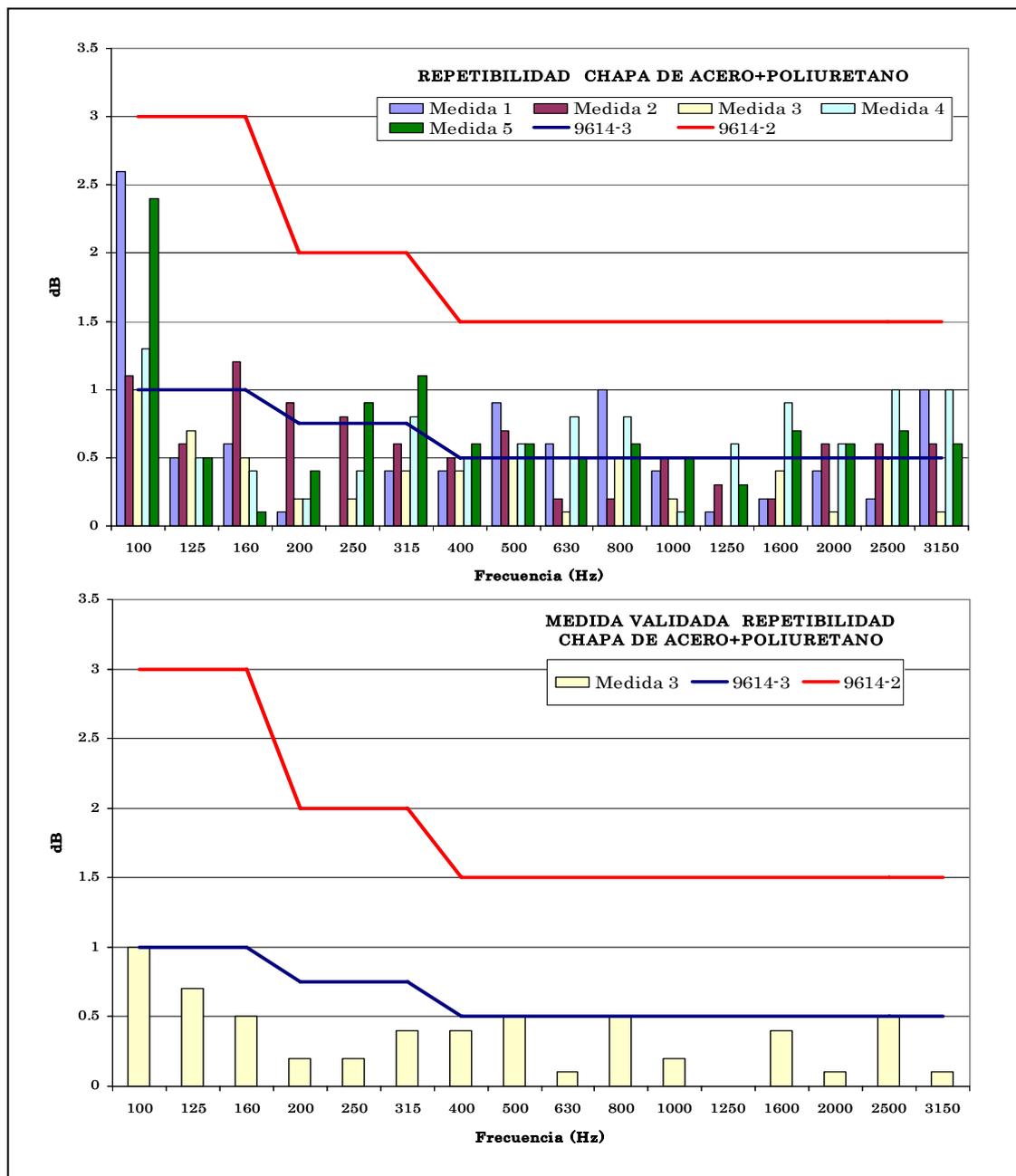


Figura 6.15.- Valores de la repetibilidad obtenida con la probeta donde se combinan la chapa de acero (M5) con la probeta de poliuretano (M6).

Por último, en la figura 6.16 se pueden ver los valores de repetibilidad de la intensidad sonora que incide sobre las probetas. En este caso se ha barrido la superficie de medida sin probeta, por lo que los valores obtenidos se corresponden con la onda sonora creada directamente por la fuente. Al igual que en el resto de probetas, la validación de la parte 2 de la norma UNE EN ISO 9614 se ha conseguido para la totalidad de las medidas realizadas, siendo la precisión obtenida la correspondiente al grado de ingeniería, es decir de 1 dB.

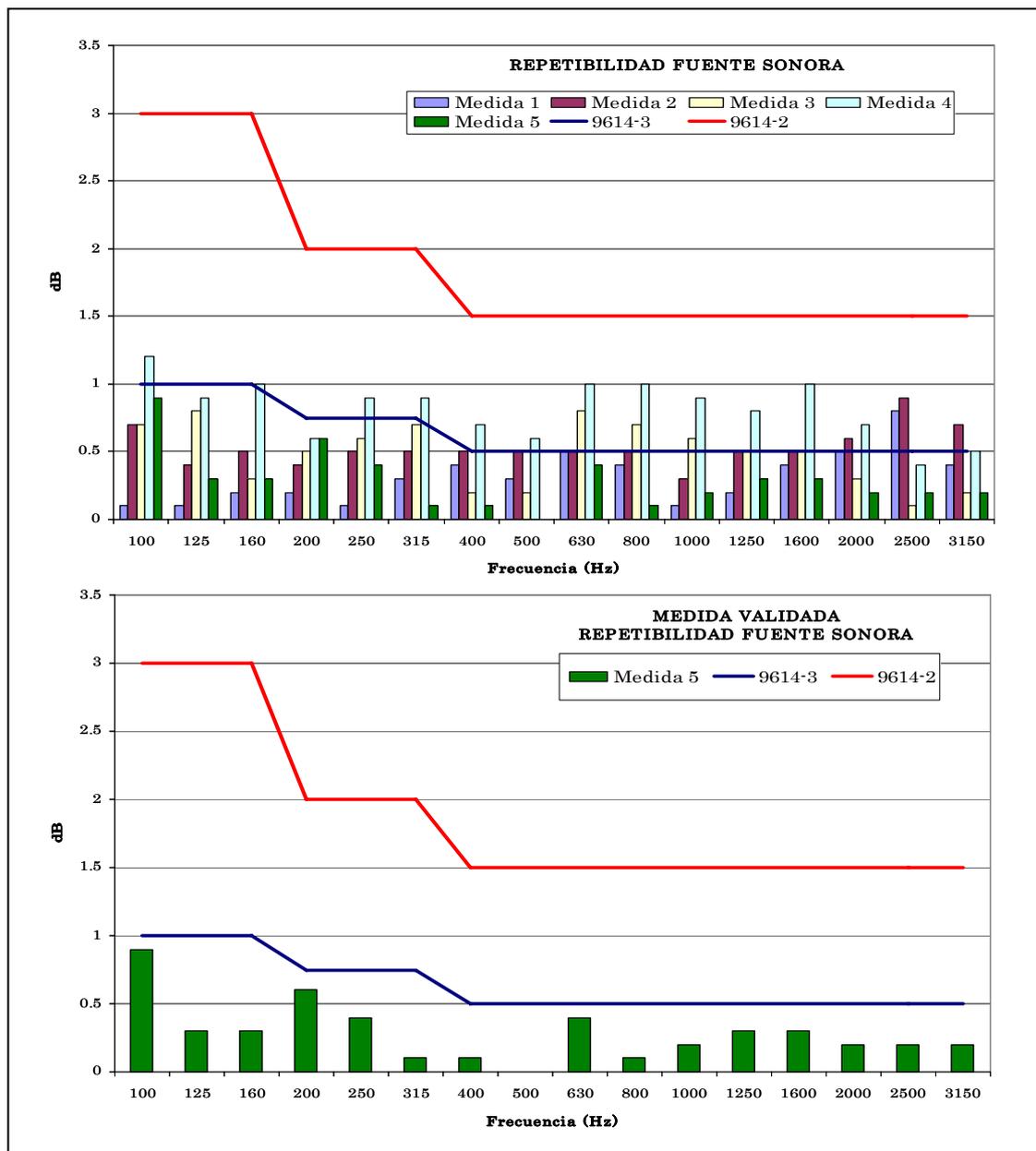


Figura 6.16.- Valores de la repetibilidad y su validación en la medida de la intensidad acústica incidente sobre las probetas.

Por lo tanto, se puede afirmar que se ha conseguido la validación de la repetibilidad de todas las medidas con el grado de precisión de ingeniería, considerado como grado 2 en la normativa. Con respecto al cumplimiento de los criterios de repetibilidad especificados en la UNE EN ISO 9614 parte 3, que aportan una precisión de grado 1 (0,5 dB), como mínimo se ha validado una medida para cada probeta. El cumplimiento de este criterio es fundamental para aceptar como válido el Índice de Reducción Sonora (R) obtenido para cada una de las probetas ensayadas.

6.3.- Verificación de la capacidad dinámica

La validación de la capacidad dinámica para un ancho de banda concreto es el aspecto más complejo de satisfacer cuando el campo sonoro se genera en un recinto cerrado. Sin embargo, en condiciones de campo libre, los requisitos de validación son muy fáciles de cumplir, siempre y cuando no existan fuentes de ruido externas que afecten a la medida que se está realizando. Las condiciones de campo libre en una sala son imposibles de conseguir, excepto cuando pueda considerarse anecóica. La dificultad de validar este parámetro estriba en la reactividad que caracteriza a un campo sonoro cuando se propaga en el interior de un recinto. Esta circunstancia supone la necesidad de absorber parte de la energía radiada antes de que se cree el campo difuso. Por ello, en la realización de las medidas, se colocó material absorbente en la pared donde incidía frontalmente la onda sonora. Este ligero acondicionamiento del recinto fue suficiente para validar la capacidad dinámica en todas las medidas con el mayor grado de precisión.

En las figuras siguientes se muestran los resultados obtenidos, la diferencia entre el nivel de la presión sonora y el nivel de la intensidad sonora tiene que ser inferior al índice de presión-intensidad residual de la instrumentación de medida para cada frecuencia más una constante relacionada con el grado de precisión que se pretende conseguir. En la figura 5.8 del capítulo 5 de esta tesis doctoral, se han representado los valores del índice de presión-intensidad residual de los distintos separadores de micrófonos estándar, así como, el índice de presión-intensidad residual correspondiente al separador de 18 mm diseñado para los ensayos. Los valores realmente no son exclusivos del separador, sino de la cadena de medida completa utilizada a la cual se le ha incorporado un separador de micrófonos específico.

En la figura 6.17 se aprecian los valores del índice presión-intensidad calculados para la probeta de polietileno (M1). Los valores son claramente inferiores a los requeridos por la norma UNE EN ISO 9614-3 para las cinco medidas realizadas. Es más, a diferencia con el criterio de repetibilidad, los resultados son casi idénticos para cada frecuencia. Esta circunstancia indica que el campo sonoro creado en el recinto es poco reactivo, motivado por la presencia de fuentes de escasa importancia y porque las reflexiones producidas en los paramentos que acotan el espacio de la sala no son suficientemente significativas.

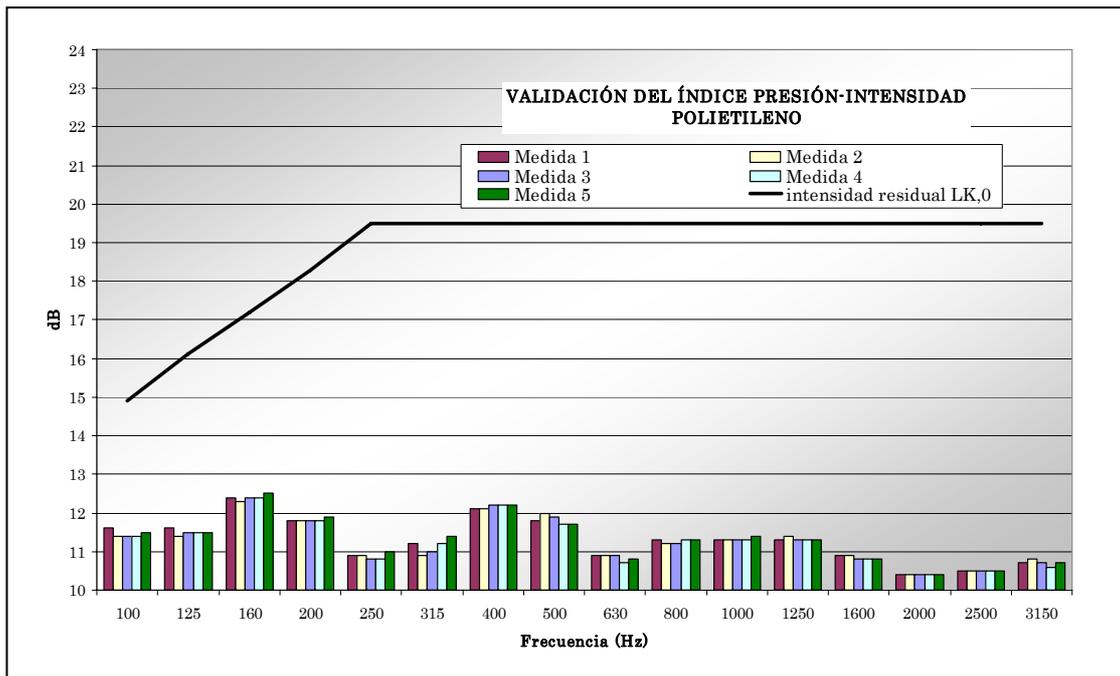


Figura 6.17.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de polietileno (M1).

En las figuras 6.18, 6.19 y 6.20, se representan los resultados obtenidos para las probetas: de caucho sintético (M2), de lana de roca (M3) y de lana de roca con revestimiento (M4). Como se puede apreciar en las figuras, este criterio de validación se cumple también con un margen más que suficiente.

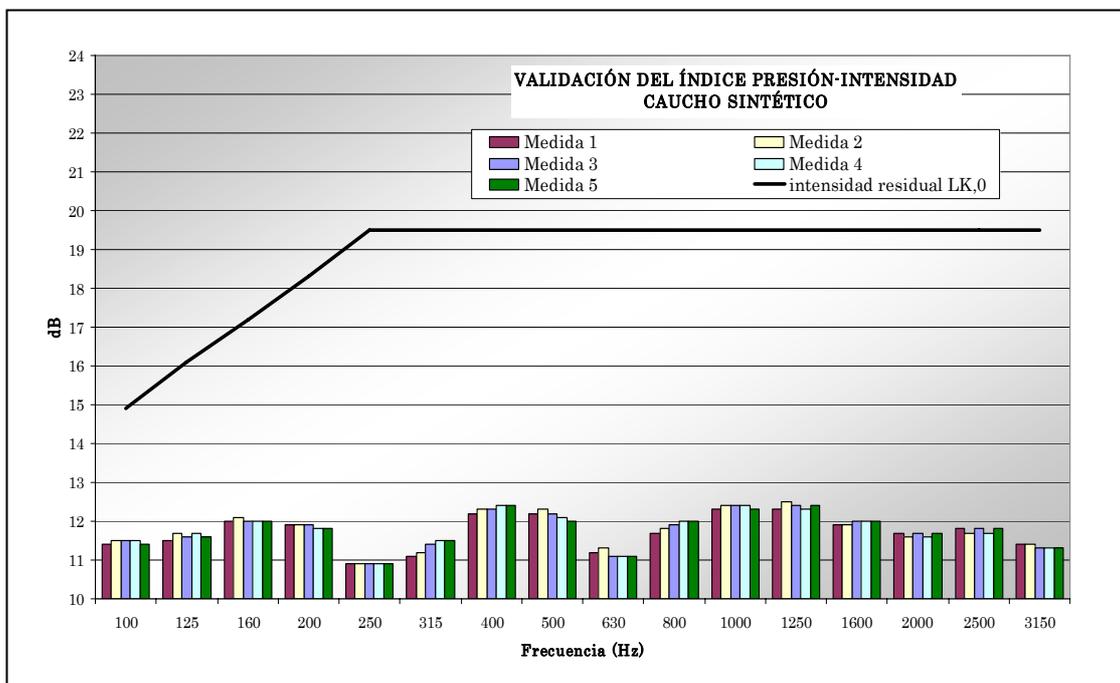


Figura 6.18.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de caucho sintético (M2).

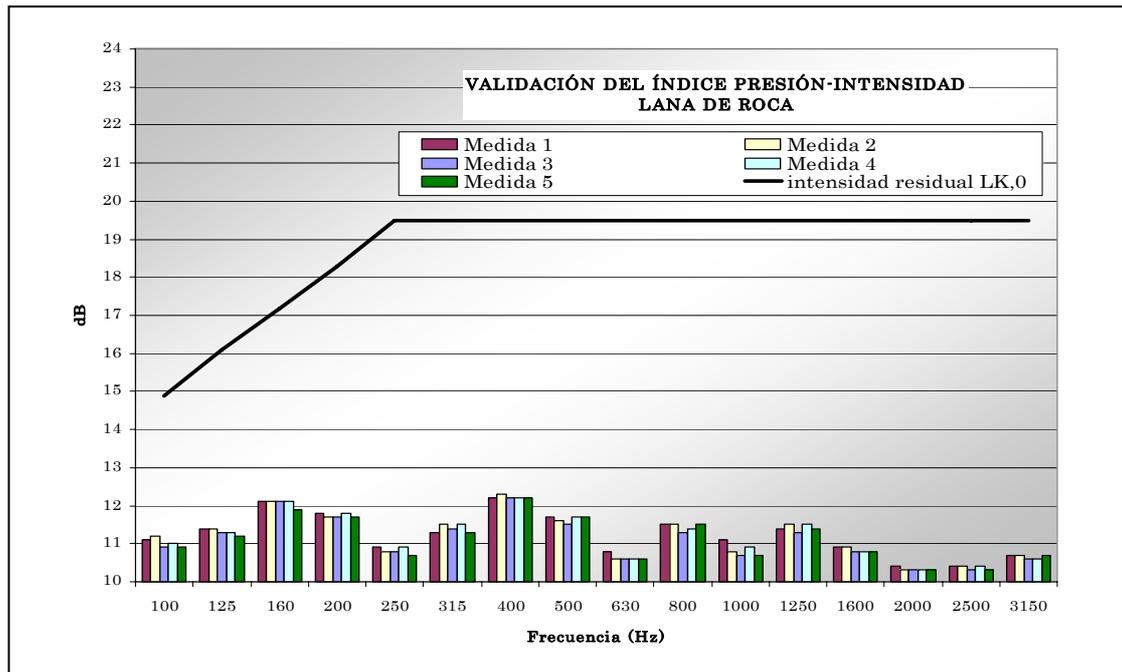


Figura 6.19.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de lana de roca (M3).

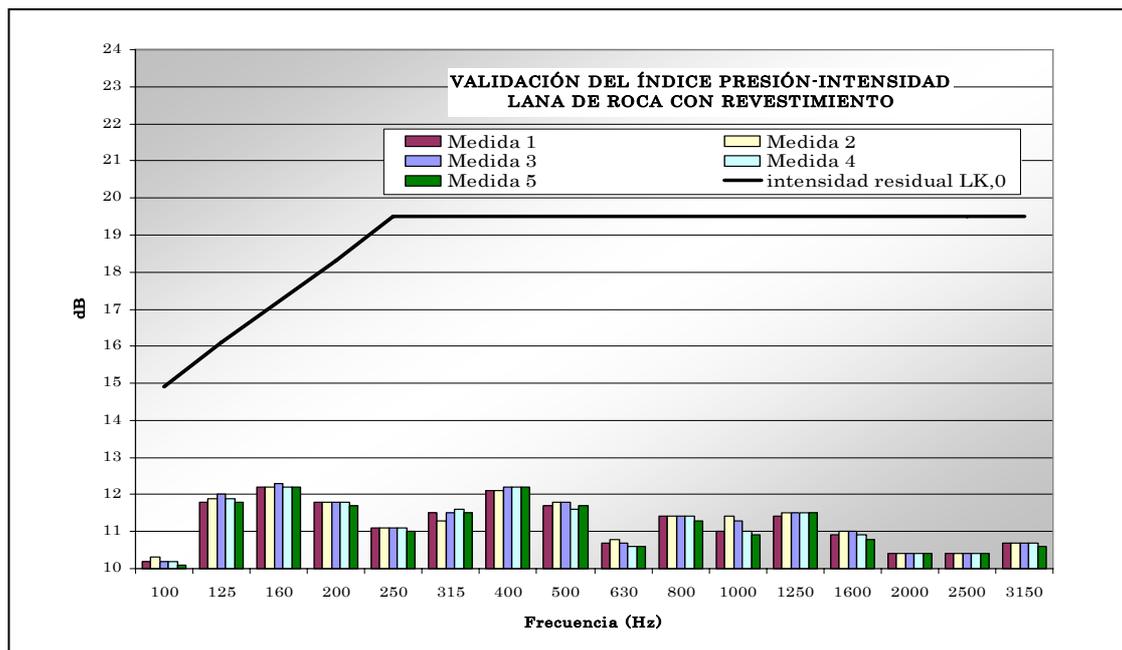


Figura 6.20.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de lana de roca revestida con velo mineral (M4).

La diferencia entre el índice presión-intensidad calculado y el límite establecido en la norma de referencia para la probeta de acero (M5) es menor que en el resto de materiales ensayados. En la figura 6.21 se puede constatar esta circunstancia que es debida a la menor energía transmitida a través de la probeta.

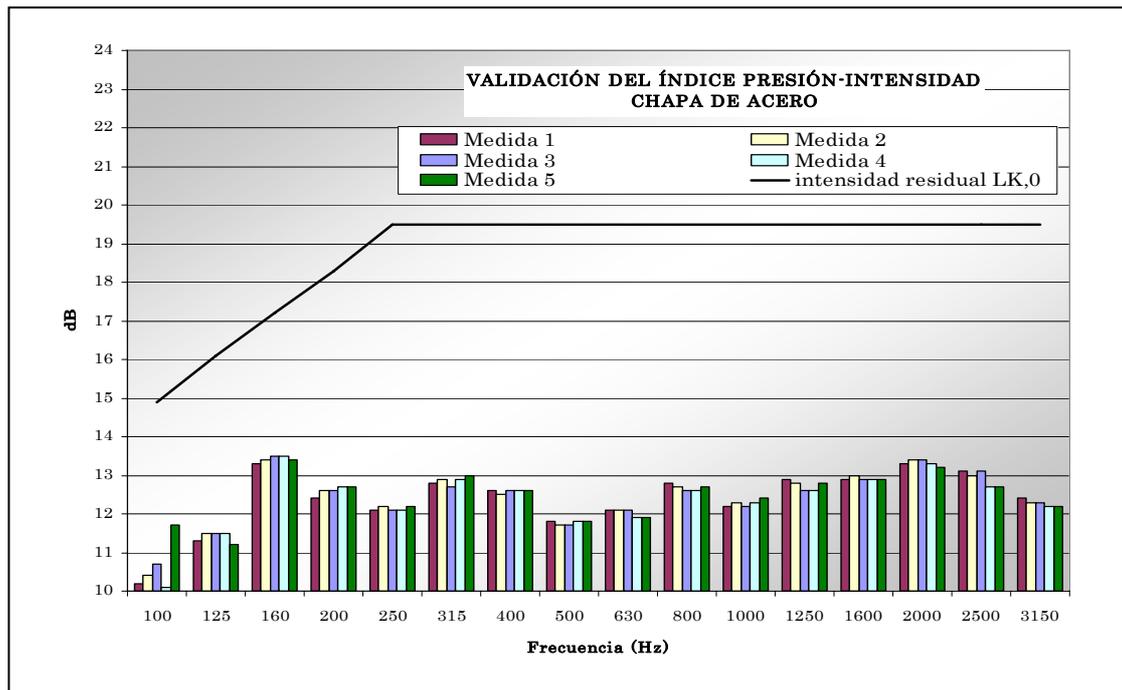


Figura 6.21.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de chapa de acero (M5).

En la figura 6.22 se muestran los valores obtenidos para la probeta de poliuretano. Mientras que en la figura 6.23, se representan los resultados de la probeta combinada de acero (M5) y poliuretano adherido a la chapa (M6).

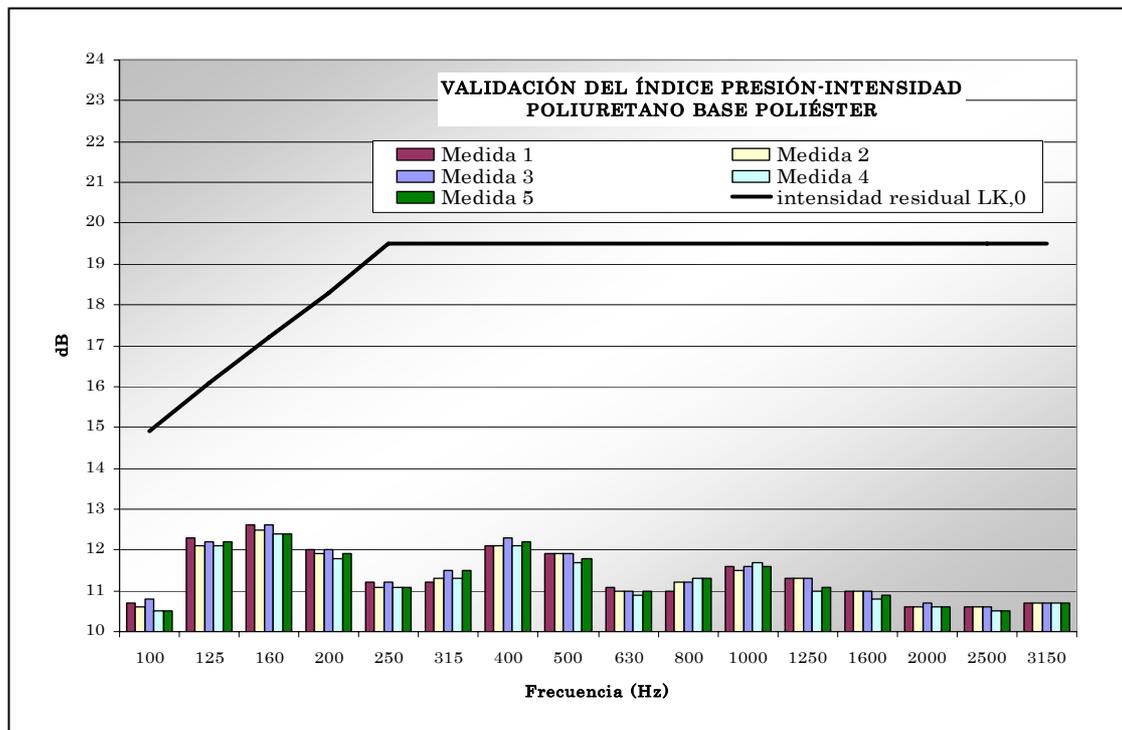


Figura 6.22.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta de poliuretano (M6).

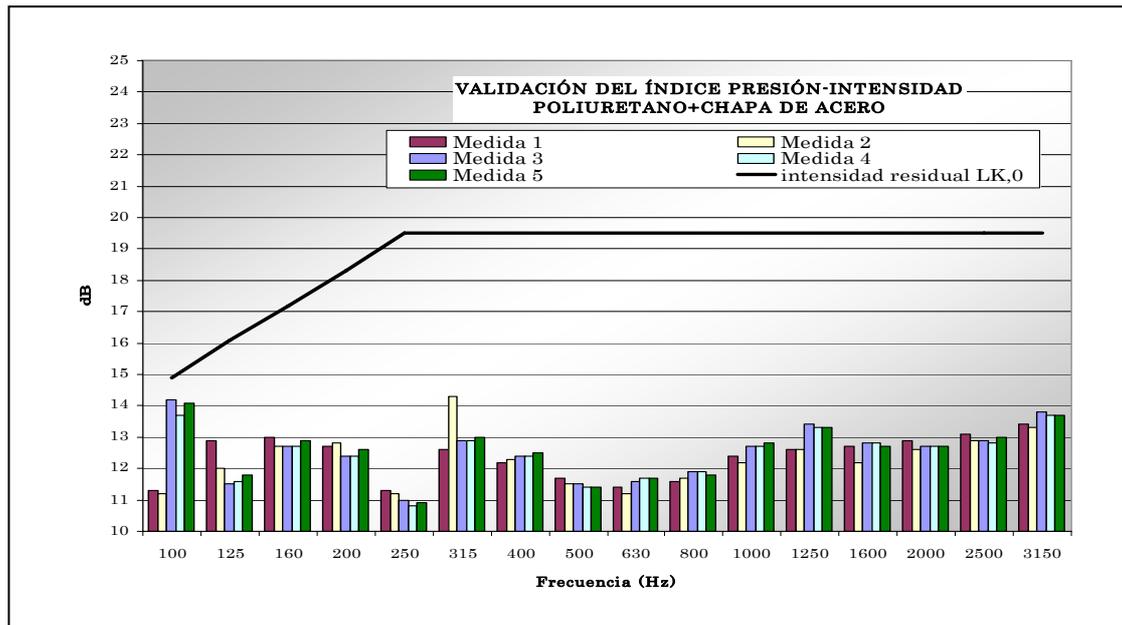


Figura 6.23.- Índice presión-intensidad calculado para la probeta combinada de chapa de acero (M5) y poliuretano (M6).

Se aprecia en la figura anterior, que la probeta que aporta el mayor aislamiento cumple los requisitos de capacidad dinámica con el menor margen respecto al valor límite permitido por la norma. La causa, como ya se comentó en el caso de la repetibilidad, se debe a que las fuentes exteriores y la reactividad del campo sonoro tienen una influencia mayor en la medida de la intensidad sonora neta. Esta situación no se da cuando se mide la energía emitida por la fuente sonora, como se comprueba en la figura 6.24.

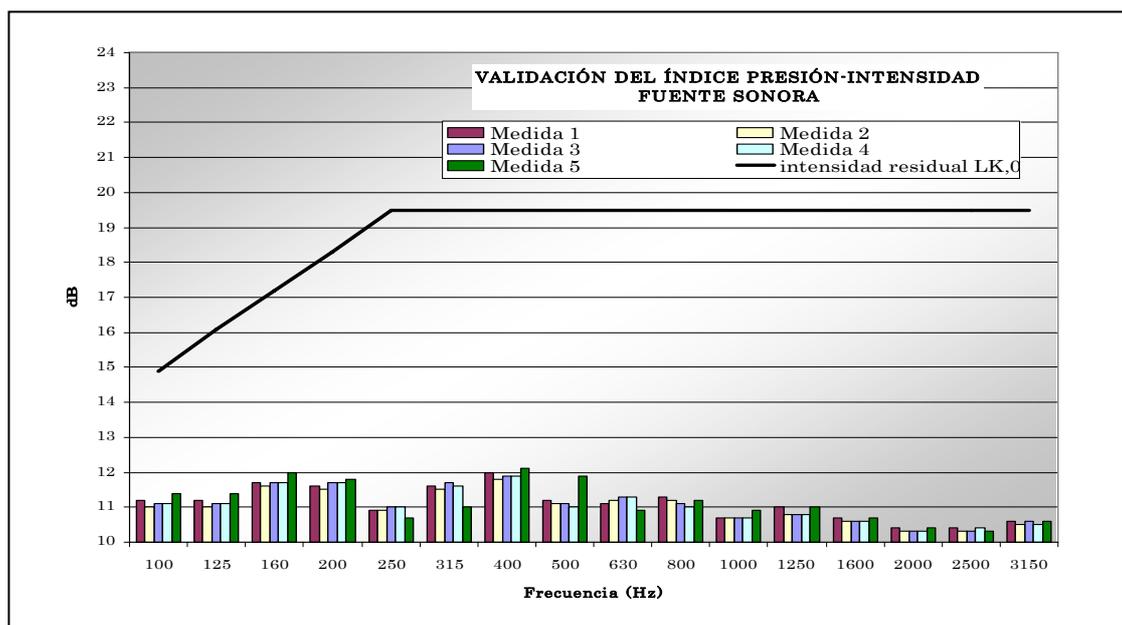


Figura 6.24.- Índice presión-intensidad calculado para la energía emitida por la fuente sonora.

Se ha validado sin dificultad el criterio de capacidad dinámica para todas las medidas realizadas y con el mayor grado de precisión requerido. Esto se ha conseguido sobre todo por la calidad de la cadena de medida utilizada que posee un desfase entre canales muy pequeño. Empezando por los micrófonos que son calibrados en fábrica de forma pareada, continuando por un correcto diseño del separador de micrófonos y concluyendo con el uso de una instrumentación de elevada precisión. Otro factor que ha ayudado a la validación de las medidas ha sido el material absorbente colocado estratégicamente en una de las paredes de la sala, que ha reducido la reactividad del campo sonoro dentro del recinto. En cualquier caso, la reactividad del campo sonoro no se considera determinante para la realización de los ensayos.

Por último, el criterio de la capacidad dinámica también se ve afectado si en el momento de realizar el barrido no se mantiene la perpendicularidad de la sonda con respecto a la superficie medida, así como, la distancia de separación de la sonda de intensidad sonora a dicha superficie y una velocidad de avance constante en el proceso de barrido.

6.4.- Verificación de la diferencia de intensidad sonora en posición normal e invertida de la sonda.

Este tipo de comprobación está relacionado con la incidencia de la sonda de intensidad ubicada en el campo sonoro donde se realiza la medición. Está claro que la estructura que soporta los micrófonos, así como éstos, inciden en la propagación del campo sonoro. Una forma de valorar esta incidencia consiste en medir la intensidad sonora en un punto de la superficie de medida con la orientación normal de la sonda. A continuación se invierte la sonda y se mide de nuevo en el mismo punto. La diferencia entre las amplitudes obtenidas para cada banda del espectro no debe exceder de 1 dB, según lo requerido por la parte 3 de la norma UNE EN ISO 9614.

Como se aprecia en la figura 6.25, la diferencia máxima de 1 dB entre los valores con la sonda orientada normalmente o invertida, se cumple en todas las bandas de frecuencia comprendidas entre los 200 Hz y los 3,15 kHz. En el intervalo de frecuencia de 100 Hz a 200 Hz, la diferencia entre niveles de intensidad sonora se encuentra en el límite.

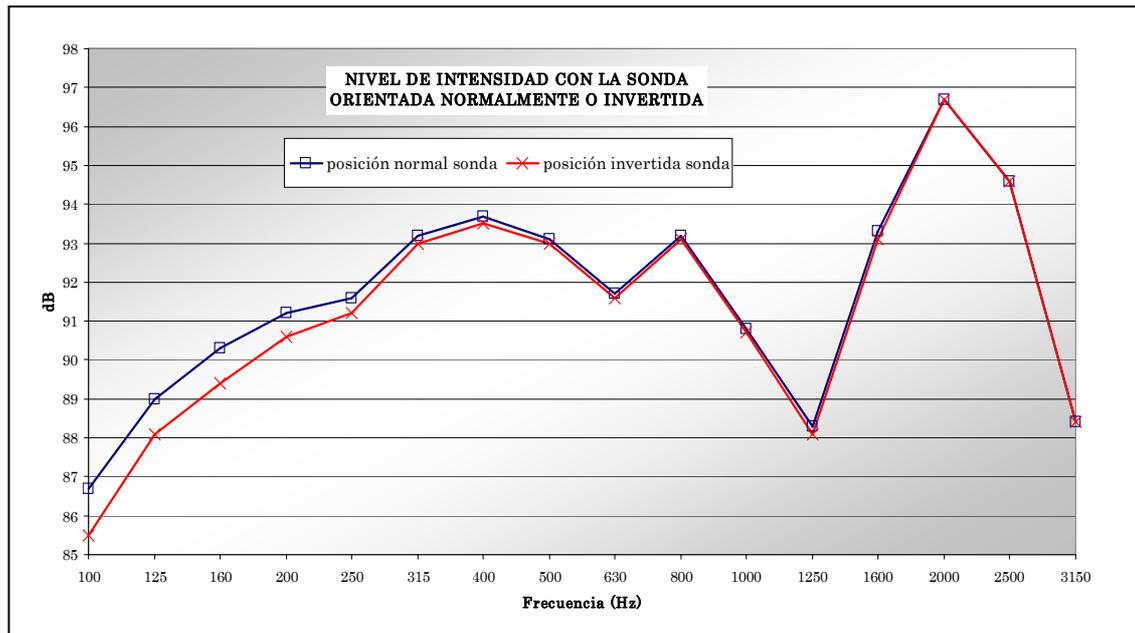


Figura 6.25.- Valores de intensidad obtenidos con la sonda orientada normalmente e invertida.

El cumplimiento de esta exigencia está relacionado nuevamente con la calidad de la instrumentación de medida, especialmente con la sonda de intensidad sonora que debe influir lo menos posible en el campo sonoro donde se ubica.

6.5.- Índices de reducción sonora

La obtención de los índices de reducción sonora de cada una de las probetas es uno de los objetivos planteados en el capítulo 1 de esta tesis. Antes de proceder a su determinación se ha mostrado en los apartados anteriores los criterios que permiten validar las medidas. Para obtener el Índice de Reducción Sonora (R), basta con restar al nivel de intensidad acústica medido sobre la fuente (energía incidente) el nivel de intensidad acústica medido para cada probeta colocada en la caja de ensayo (energía transmitida).

En la figura 6.26 se muestran los espectros de energía transmitida para cada una de las probetas, así como la energía incidente generada por la fuente sonora. Comparando los resultados obtenidos se aprecia que los materiales ligeros dejan pasar un flujo de energía acústica mas elevado que la probeta de chapa de acero (M5), siendo mayor la diferencia a frecuencias medias y altas. Esta peculiaridad se debe a que la probeta de acero sigue la ley de masa, mientras que el resto de los materiales no poseen este comportamiento lineal frente a la densidad superficial.

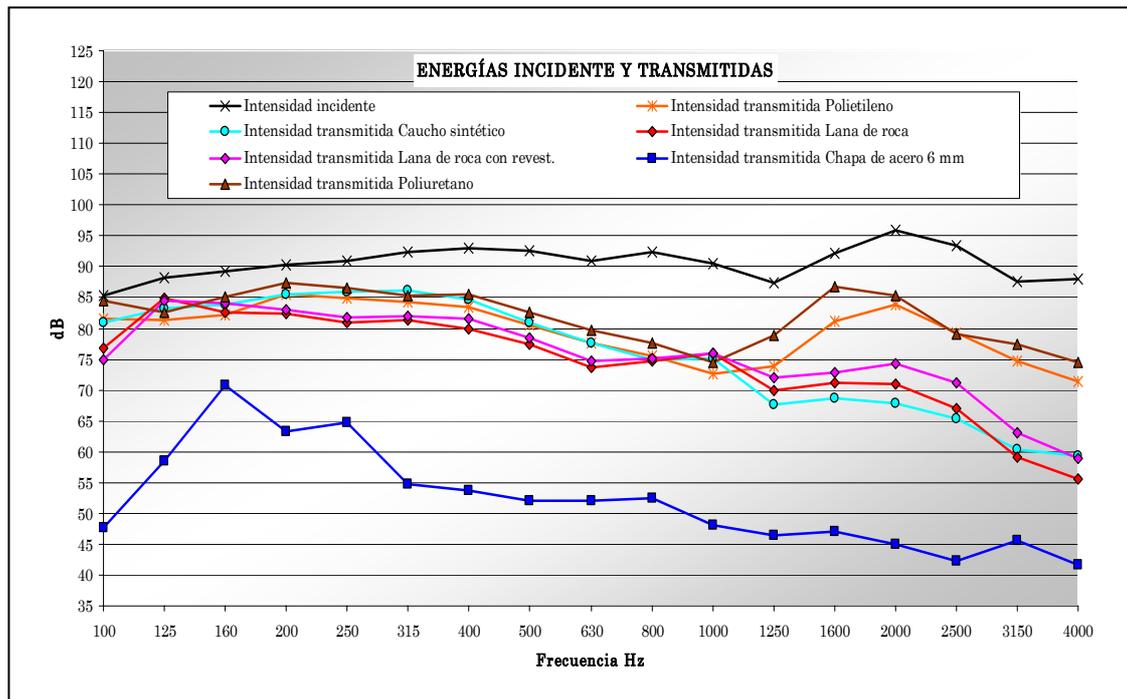


Figura 6.26.- La intensidad acústica incidente sobre las probetas es representada por la línea negra. La intensidad acústica transmitida para cada probeta se representa con líneas de color.

Sin embargo, en el intervalo de frecuencia comprendido entre 100 Hz y 250 Hz la diferencia es menor. La causa por la que la chapa de acero no tiene un comportamiento mejor a baja frecuencia se debe a la influencia de los modos propios de vibración de la chapa, que originan una emisión de energía acústica adicional.

Los valores del Índice de Reducción Sonora (R), obtenidos finalmente se muestran en la figura 6.27. Analizando los resultados y estableciendo un orden descendente en cuanto al comportamiento más eficaz de cada material, se aprecia que la chapa de acero es la probeta que mejor comportamiento ha tenido obviamente. Los materiales ligeros poseen un comportamiento más difícil de prever. De una parte, los materiales más densos por unidad de superficie son la lana de roca (M3 y M4) y el caucho sintético (M2). Este último material tiene un comportamiento muy bueno a alta frecuencia, mientras que a frecuencias medias y bajas su atenuación es muy pobre. Por otra parte, desde un punto de vista global, la lana de roca (M3 y M4) posee mejores condiciones como aislante. Con las probetas de polietileno de baja densidad (M1) y con la de poliuretano (M6) se obtienen los peores resultados, fundamentalmente porque su densidad por unidad de superficie es muy baja. Realmente estos materiales ligeros no actúan siguiendo la ley de masa, siendo su carácter poroso el que predomina en el proceso de absorción de la energía acústica.

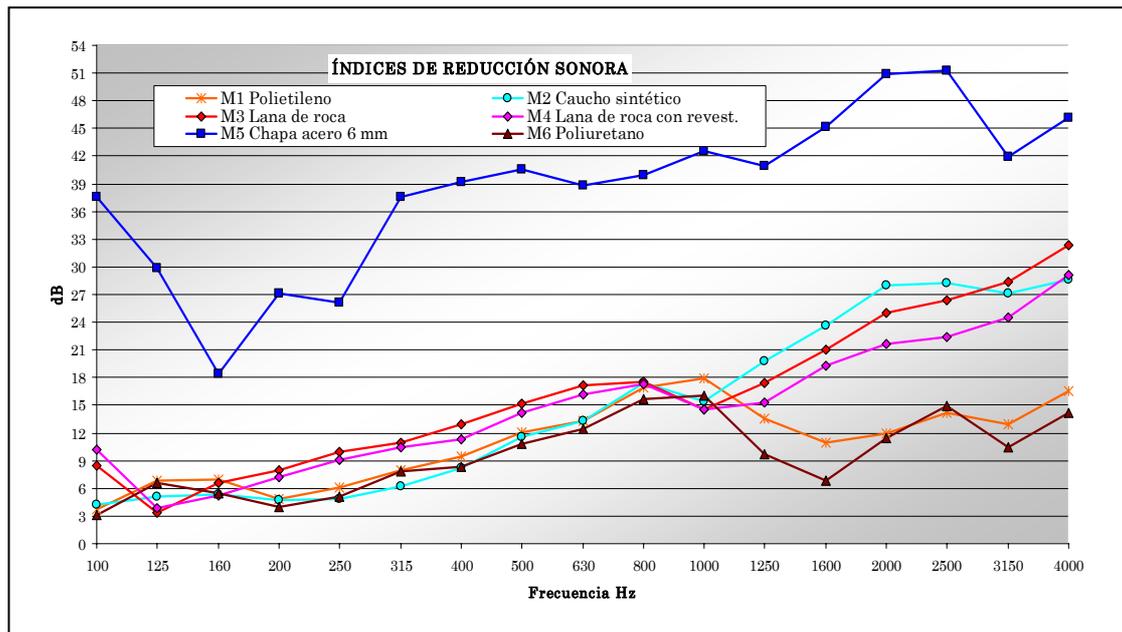


Figura 6.27.- Resultados del Índice de Reducción Sonora (R) para cada uno de los materiales ensayados. La probeta de acero ($M5$) es la que tiene mejor comportamiento. De los materiales ligeros, el material que mejor se comporta es la lana de roca ($M3$ y $M4$).

En principio era previsible que las lanas de roca, que son de igual espesor y densidad, se comportaran exactamente igual. Sin embargo, aunque los resultados son muy parecidos, el comportamiento de la probeta de lana de roca con revestimiento ha sido ligeramente peor. La causa puede estar en el proceso de fabricación de la lana de roca. Es posible que la lana de roca sin revestimiento posea mayor porosidad.

También se ha ensayado la envolvente de la estructura que contiene la fuente sonora, formada por chapas de acero de 6 milímetros de espesor ($M5$) recubiertas interiormente del material de la probeta de poliuretano ($M6$). En la figura 6.28 se han representado los índices de reducción sonora de las dos probetas por separado, así como el correspondiente a la probeta combinada. Como se aprecia en la figura, la probeta mixta tiene un comportamiento como aislante acústico similar al de la probeta de acero, aunque mejorada significativamente a frecuencias altas. Con esta combinación de materiales se han conformado todos los cerramientos de la caja de ensayo, siendo su nivel de aislamiento acústico lo suficientemente elevado para que al colocar una probeta en la estructura de ensayo, la energía fluya mayoritariamente a través de ella. El resto de las caras de la estructura ofrecen una gran impedancia a la transmisión de la onda sonora, generando un campo poco reactivo en la sala de ensayo.

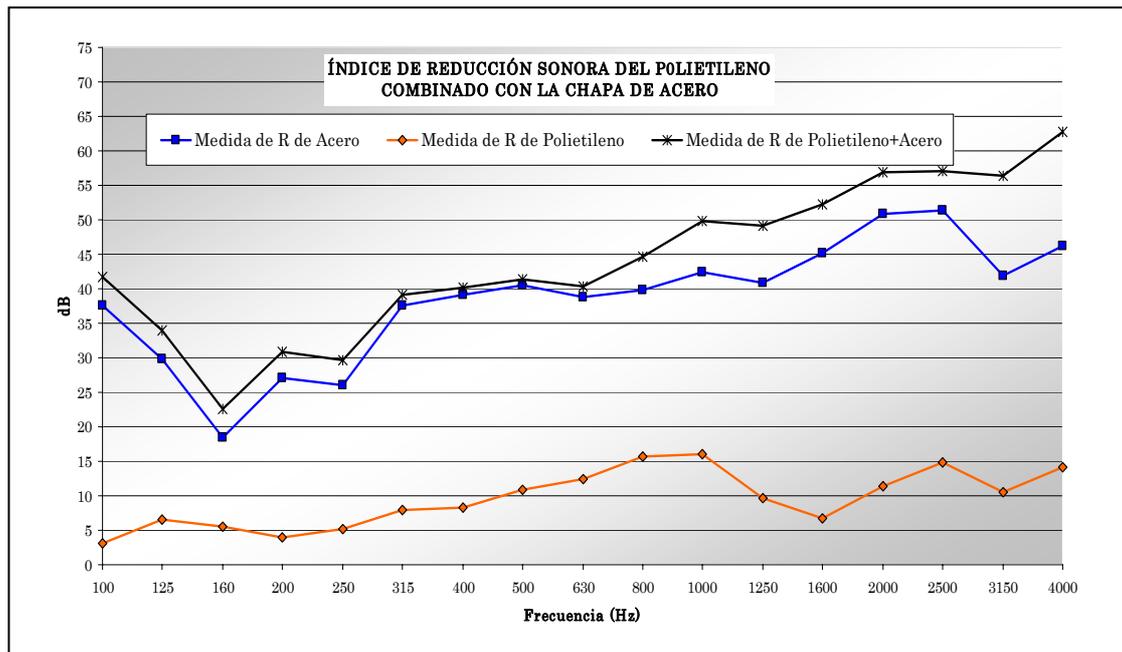


Figura 6.28.- Índice de Reducción Sonora (R) obtenido para los materiales empleados en la construcción de la estructura de ensayo, chapa de acero (M5) de 6 milímetros de espesor con una superficie adherida de poliuretano base poliéster (M6) por la cara interior.

En todo momento se ha pretendido obtener los índices de reducción sonora de los distintos materiales ligeros, pero también era necesario determinar los valores del resto de la estructura de ensayo con el fin de analizar su incidencia en el proceso de medida. En este caso se puede considerar que la aportación es despreciable frente a la energía que fluye a través de la zona de ubicación de las probetas. La facilidad con la que se ha validado la capacidad dinámica indica que el campo sonoro generado no es muy reactivo.

6.6.- Resultados de los ensayos modales sobre la probeta de acero (M5)

Con la finalidad de caracterizar el comportamiento de la probeta de chapa de acero (M5), además de determinar su Índice de Reducción Sonora (R), se ha estudiado su comportamiento modal en el rango de frecuencia comprendido entre los 100 Hz y los 3,15 kHz. La determinación de las frecuencias resonantes de la estructura ayuda a comprender su comportamiento desde el punto de vista de la vibroacústica. Conviene recordar que las probetas están sometidas a un campo sonoro unidireccional, generado por una fuente sonora a la que se le introduce una

señal de ruido rosa. La onda incidente sobre la probeta excita los modos propios de la chapa de acero y se produce el efecto físico de la resonancia, que de alguna manera debe intervenir en la respuesta final de la probeta.

Para poder hacer ensayos modales es necesario excitar la estructura por medio de un martillo específico de análisis modal o por medio de un excitador modal. Ambos instrumentos pueden generar la entrada, siempre y cuando incorporen un sensor de fuerza. La salida es medida por medio de un acelerómetro o un conjunto de ellos. La relación entre la salida y la entrada permite obtener la Función de Respuesta en Frecuencia. Cuando la salida se mide en unidades de velocidad de vibración (m/s) y la entrada en unidades de fuerza (N), la función de transferencia recibe el nombre de movilidad. Esta es la función utilizada en los ensayos de análisis modal de este capítulo. La movilidad de un sistema aporta información de interés en cuanto a identificar las frecuencias donde la estructura objeto de análisis tiene mayor facilidad para vibrar.

Los resultados que se muestran en este apartado se han obtenido por medio de dos tipos de ensayo diferentes. El primer procedimiento de ensayo, consiste en determinar la respuesta de la estructura en varios puntos, excitando el sistema por medio de un martillo de diseño y fabricación propia. Se han analizado los resultados y se han identificado las frecuencias resonantes de la probeta de acero. En ningún caso se ha pretendido conocer los modos de vibración, aunque de los ensayos realizados se haya obtenido la información necesaria para su determinación. En el segundo procedimiento de ensayo, además de obtener el valor de la fuerza de entrada y la velocidad de vibración de la probeta, se ha medido la intensidad sonora emitida en el momento del impacto con el fin de relacionar la emisión acústica con la vibración de la chapa de acero.

6.6.1.-Frecuencias resonantes de la probeta de acero (M5)

En primer lugar se describe el comportamiento de la excitación del sistema, llevada a cabo con un martillo diseñado a partir de un sensor de fuerza y cuyas características han sido expuestas en el capítulo 5. El primer requisito a determinar es el rango de linealidad de la fuerza excitadora frente a la frecuencia. Teniendo en cuenta que esta propiedad depende del tipo de puntera utilizada en el momento de golpear, se muestra en la figura 6.29 su comportamiento para punteras de: acero,

aluminio y teflón. Con la puntera de teflón se han realizado dos medidas: una con la masa de inercia calculada de 68 gramos y otra incorporándole una masa adicional de 39 gramos.

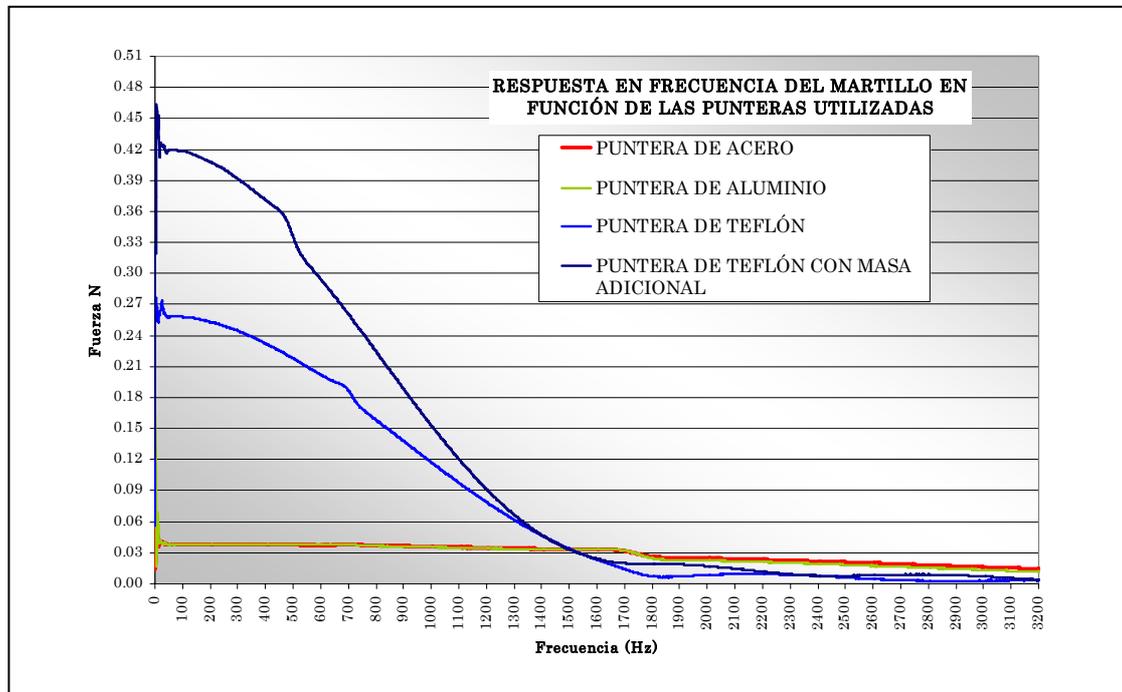


Figura 6.29.- Resultados del ensayo de linealidad para distintos tipos de punteras con el martillo diseñado para excitar la probeta de acero (M5).

Como se aprecia en la figura 6.29, el comportamiento de las punteras de acero y aluminio es muy similar en cuanto a la linealidad de la excitación frente a la frecuencia. Se comprueba que el ancho de banda de interés, en el desarrollo de los ensayos de 100 Hz a 3,15 kHz, es excitado adecuadamente con este tipo de punteras. Por esta razón, se ha utilizado la puntera de acero para la realización de las medidas de análisis modal. Por otra parte, con la puntera de teflón la linealidad obtenida no es muy buena como era de esperar y solo se podría utilizar este tipo de puntera para ensayos donde sea necesario excitar frecuencias muy bajas, ya que a frecuencias altas la excitación resulta además muy débil. Utilizando la masa adicional con la puntera de teflón no se mejora la linealidad de la excitación, tan solo aumenta la fuerza en el momento del impacto como es lógico.

Conocidas las características en frecuencia del martillo utilizado para excitar la probeta de acero, es decir la entrada en el ensayo modal, se muestran a continuación los resultados obtenidos como salida del sistema. Dos tipos de señales de salidas se han obtenido: la velocidad de vibración de la chapa de acero y la

intensidad sonora emitida por la probeta al vibrar. En la figura 6.30 se aprecian los espectros de: la vibración de la chapa de acero, la intensidad sonora y la Función de Respuesta en Frecuencia (FRF).

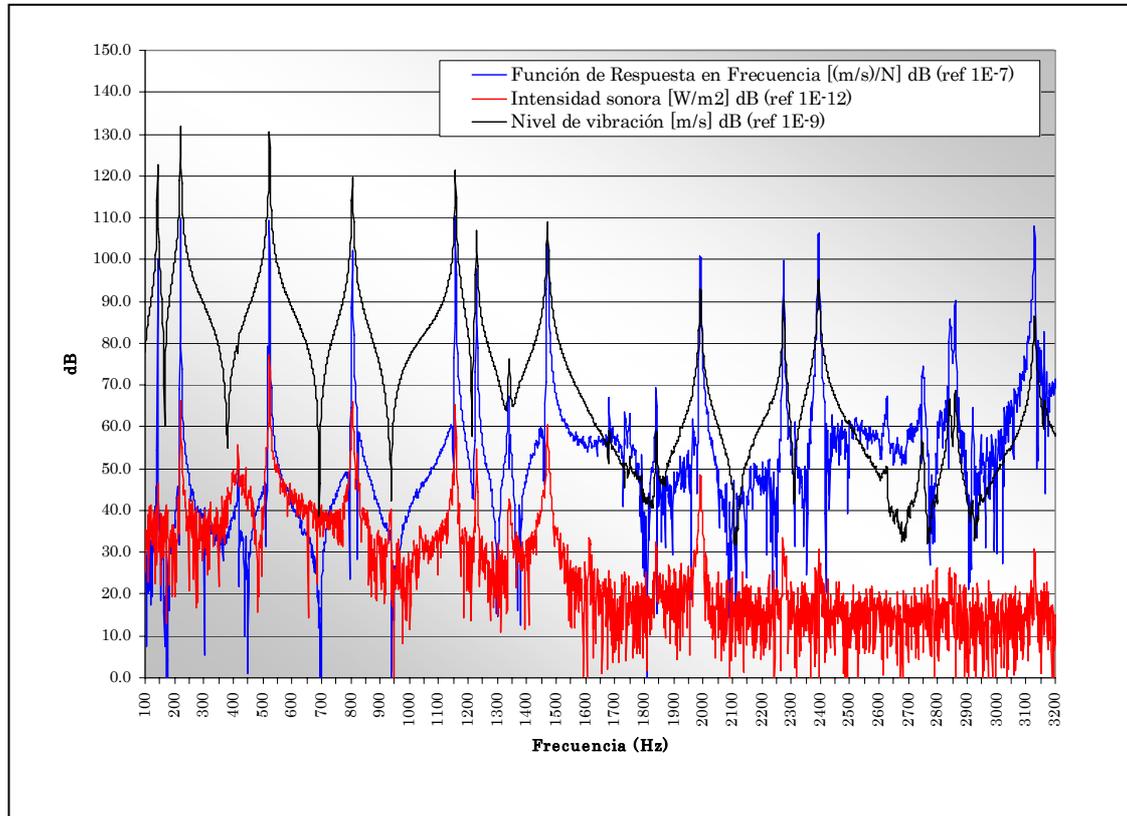


Figura 6.30.- Espectros de vibración, intensidad sonora y Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) obtenidos en el ensayo modal de la probeta de acero (M5) para todo el ancho de banda.

Para poder comparar los resultados obtenidos, éstos se han representado en decibelios, aplicándose en cada caso la referencia más adecuada para que los tres espectros estuvieran en una escala comparable. Como se puede apreciar en la figura 6.30, las frecuencias naturales de la estructura se muestran de forma más nítida en los primeros modos. Esto está directamente vinculado al procedimiento de excitación. En la tabla 6.1 se recogen las frecuencias naturales más significativas obtenidas del ensayo de análisis modal en el ancho de banda de interés, es decir desde 100 Hz hasta 3,15 kHz.

Tabla 6.1.- Frecuencias naturales relevantes en el intervalo de 100 Hz a 3150 Hz.

Frecuencias en Hz												
143	221	523	806	1157	1229	1341	1471	1992	2275	2394	2860	3129

En la figura 6.31 se representan las frecuencias naturales que mayor incidencia tienen en el comportamiento de la probeta de acero (M5). Resulta evidente la coincidencia de los picos de los tres espectros, lo que significa que el patrón vibratorio de la probeta de acero coincide con el patrón de emisión acústica.

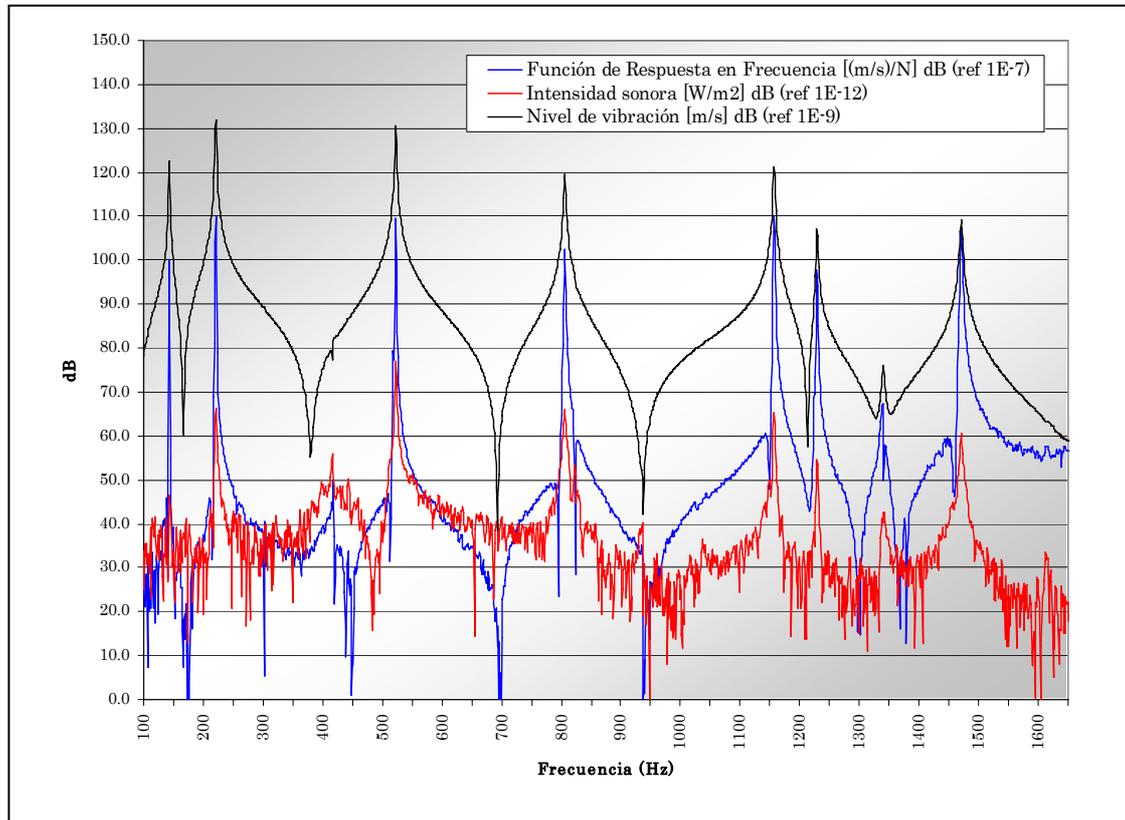


Figura 6.31.- Espectros de vibración, intensidad sonora y Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) obtenido en el ensayo modal de la probeta de acero (M5) para el intervalo de frecuencia comprendido entre 100 Hz y 1600 Hz.

En la figura 6.31 se puede ver con mayor detalle las frecuencias naturales que más influyen en el comportamiento como aislante de la probeta de acero (M5). Dichas frecuencias naturales, al ser excitadas por la onda acústica de ruido rosa, hacen vibrar con mayor amplitud la chapa de acero, por lo que la capacidad como aislante de este material se ve reducida de forma notoria. Si se compara la intensidad sonora transmitida al ensayar la probeta de acero frente a su espectro de vibración, se aprecia que el intervalo donde tiene peor comportamiento es el comprendido entre los 100 Hz y los 250 Hz, figura 6.32. Esta circunstancia se explica por la influencia de los primeros modos de la chapa de acero, que aportan al campo sonoro generado en el exterior de la caja de ensayo una cantidad de energía acústica considerable.

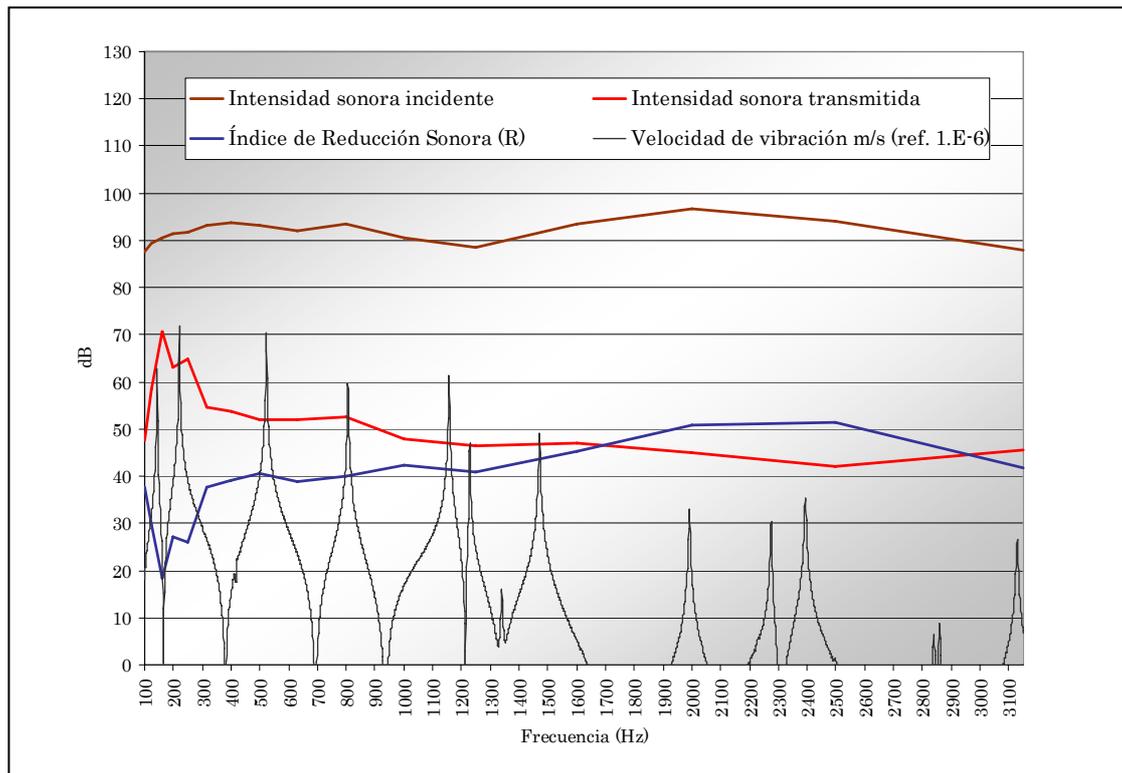


Figura 6.32.- El intervalo de frecuencia donde fluye mayor cantidad de energía acústica en el ensayo de la probeta de acero, es el comprendido entre los 100 Hz y los 250 Hz. En este intervalo se encuentran los primeros modos a flexión de la chapa de acero.

En la figura 6.32 se aprecia claramente la influencia de los dos primeros modos a flexión de la chapa de acero. Sin embargo, la incidencia de los siguientes modos no resulta demasiado importante a efectos de capacidad aislante del material. Del análisis de estos resultados se deriva que la eficiencia a la radiación de los primeros modos a flexión de la chapa de acero parece ser considerablemente mayor que la del resto de modos presentes en el espectro. Esta circunstancia puede deberse a que en las primeras frecuencias naturales la probeta vibra de una forma más simple y con una movilidad mayor. Por lo tanto, transmite mayor flujo de energía acústica desde el medio sólido al aire circundante donde se genera la onda sonora.

6.7.- Análisis de los resultados obtenidos con Autosea2 LT

La estructura de ensayo ha sido modelizada con un software comercial para aplicaciones de vibroacústica denominado AUTOSEA2 LT. La probeta considerada en el modelo es la chapa de acero de 6 milímetros de espesor (M5). Como ya se indicó en el capítulo 5, el software utilizado se basa en el método SEA (Análisis Estadístico de Energía).

En la figura 6.33 se muestran todos los elementos que forman parte del modelo: los cerramientos laterales, los perfiles angulares que los unen, las cavidades acústicas definidas en el interior de la caja de ensayo y la probeta de acero (M5).

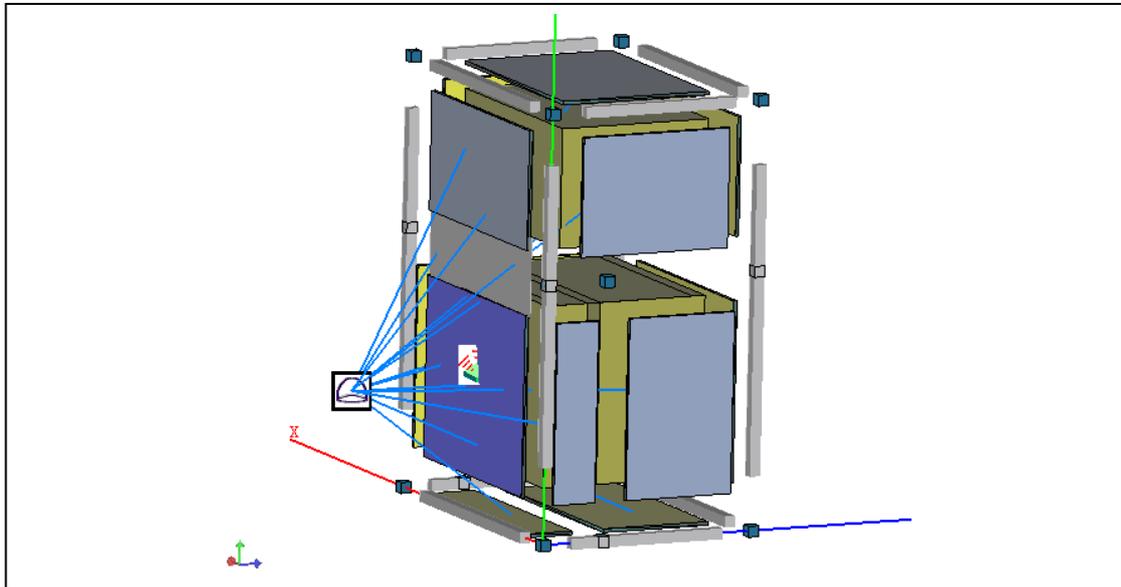


Figura 6.33. - Elementos que componen el modelo introducido en AUTOSEA2.

Una vez completado el modelo se procede al cálculo de las energías de cada uno de los elementos que lo forman, es decir, de cada uno de los subsistemas definidos. Además el software determina los niveles medios de vibración de cada elemento sólido y los niveles de presión sonora de cada cavidad acústica definida en el interior de la caja de ensayo. Como resultado final se obtiene el nivel de presión sonora en la zona de medida con la sonda de intensidad sonora.

6.7.1.-Propagación de la energía vibroacústica en la estructura

Según queda representado en la figura 6.26, la frecuencia a la que se transmite el mayor nivel de intensidad sonora para la probeta de acero (M5) es la banda de 160 Hz en tercios de octava. Por ello, se han analizado a esta frecuencia los resultados obtenidos por AUTOSEA2. En la figura 6.34 se muestra como se propaga el flujo de energía en el modelo para la banda de 160 Hz en tercios de octava. A la izquierda se aprecian los elementos estructurales que componen la caja de ensayo, incluida la probeta en color azul intenso. En el centro se vislumbran los flujos de energía cuyo valor absoluto se puede obtener según el código de colores de la derecha. Además, los valores de la energía transmitida en la unidad de tiempo son proporcionales a las dimensiones de los vectores de la figura.

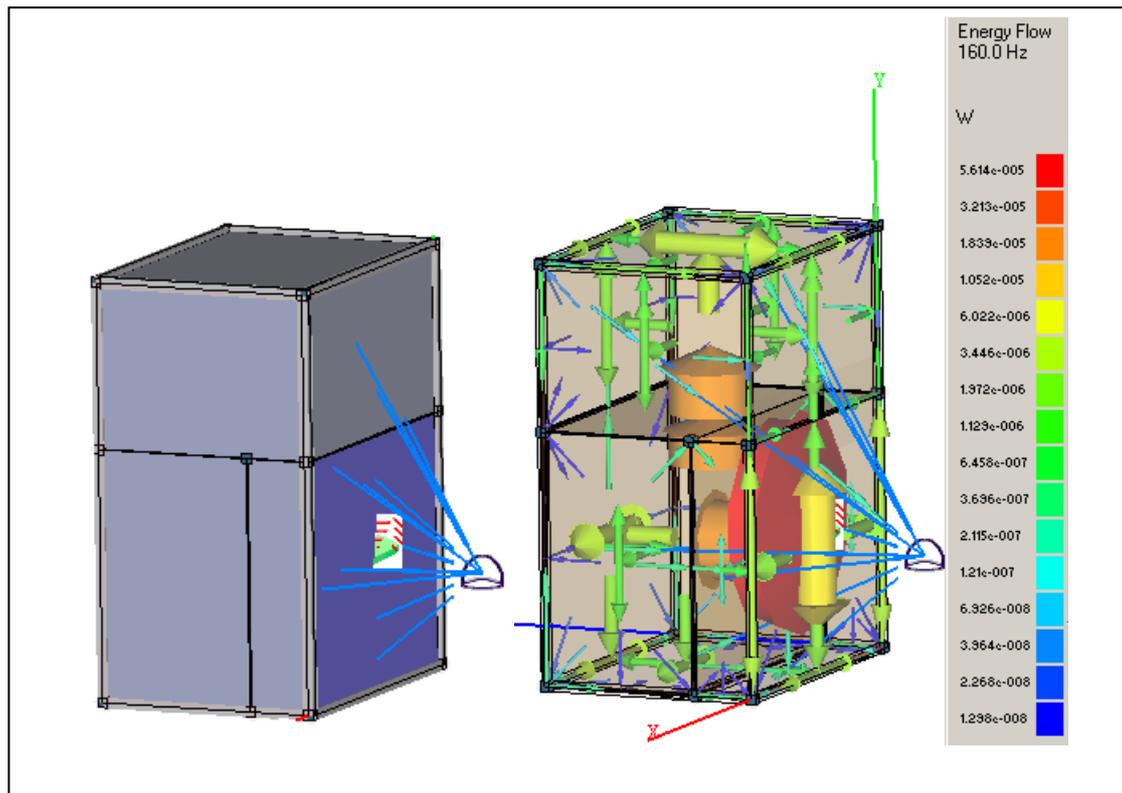


Figura 6.34.- Representación gráfica de la propagación del flujo de energía desde la fuente sonora hasta los distintos elementos que constituyen el modelo definido en AUTOSEA2.

Observando la figura 6.34 se deduce que el mayor flujo de energía, representado por el vector de color rojo, se corresponde con la zona de emisión de la fuente sonora ubicada en el interior de la caja de ensayo (onda sonora). Así mismo, la probeta es el cerramiento que mayor energía posee (vibración), ya que es el primer elemento sólido que recibe de forma directa la onda sonora generada por la fuente.

La energía de cada uno de los subsistemas del modelo también puede representarse gráficamente por medio de un termograma. La energía de un elemento del sistema varía con la frecuencia, estando relacionada ésta con el espectro de la energía que entra a cada subsistema y con su densidad modal. El termograma no representa una forma alternativa de determinar el flujo de energía sino la energía media que posee un subsistema.

En la figura 6.35 se muestra el termograma calculado por AUTOSEA2 a la frecuencia de 160 Hz. A la izquierda se representa el despiece de los subsistemas que conforman el modelo y a la derecha el termograma de dichos subsistemas con su respectiva escala o código de colores.

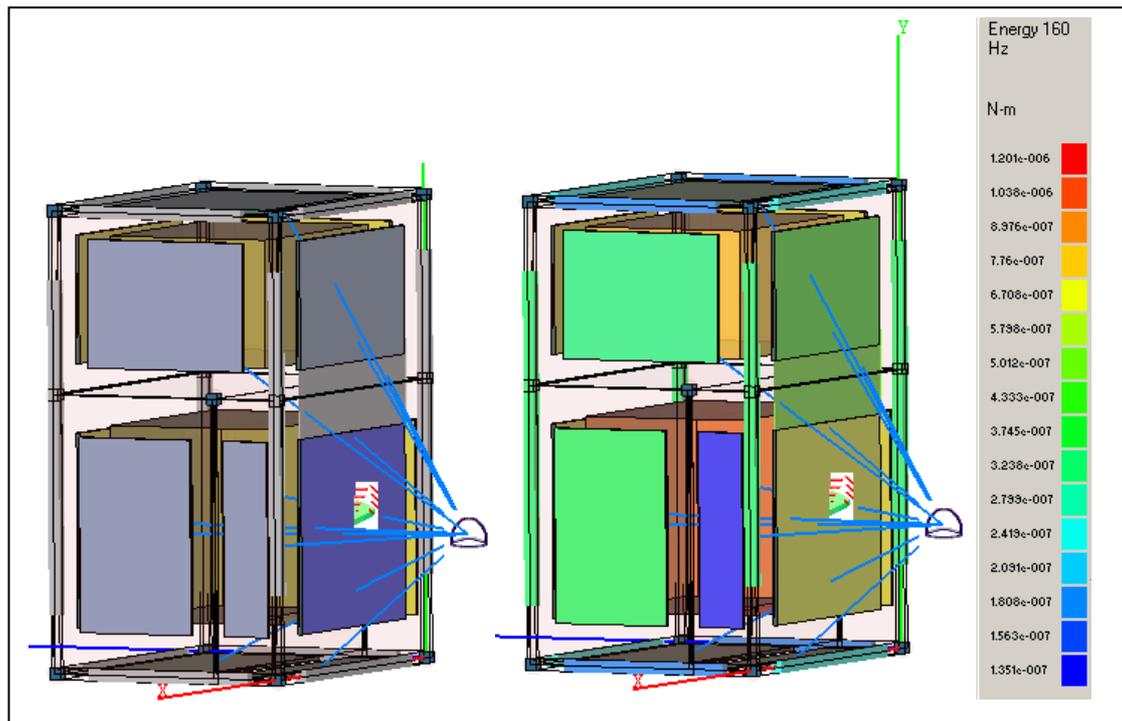


Figura 6.35- Termograma de energía obtenido para el modelo a la frecuencia de 160 Hz.

También se aprecia en la figura anterior, que la mayor energía media se genera en la cavidad acústica que existe entre la fuente sonora y la probeta. Si se tiene en cuenta solamente las placas que conforman la estructura de ensayo es la probeta la que posee mayor energía a la frecuencia de 160 Hz.

6.7.2.-Comportamiento vibratorio de la probeta de acero (M5) sometida al campo acústico generado por la fuente sonora.

Resulta evidente que el comportamiento vibratorio de la probeta de acero (M5) está relacionado con sus características intrínsecas, como son: el tipo de material, sus dimensiones y la forma en que se sujeta al resto de la estructura. Pero también es obvio, que el campo sonoro generado en el interior de la caja de ensayo, va a determinar también que frecuencias propias de la probeta van a ser excitadas. El método basado en el Análisis Estadístico de Energía (SEA), utiliza un concepto importante para valorar el comportamiento vibratorio de una placa, una viga, o cualquier otro subsistema. Ese concepto es la Energía modal, que se define como la cantidad de energía existente en una banda de frecuencia dividida por el número de modos contenidos en dicha banda. La figura 6.36 representa la energía modal de la probeta ensayada frente a la frecuencia en tercios de octava.

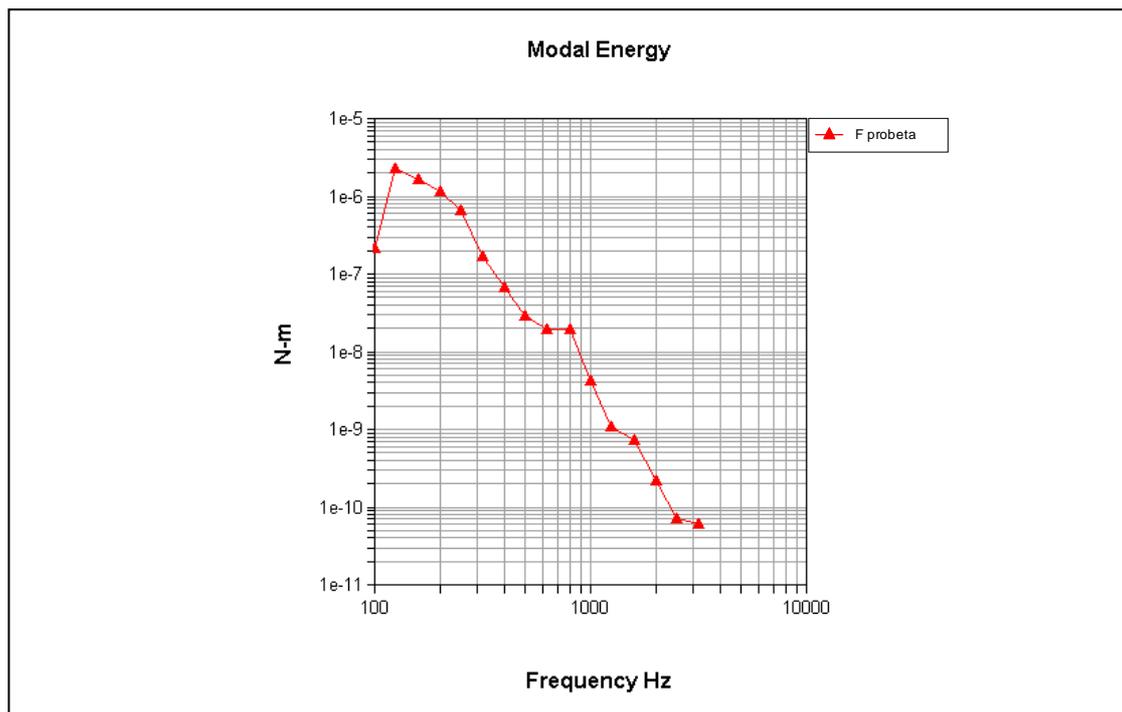


Figura 6.36- Espectro de la energía modal de la probeta de acero (M5) en tercios de octava.

En la figura 6.36 se aprecia que la banda de tercio de octava con mayor nivel de energía en relación al número de modos que posee es la de 160 Hz, algo previsible si se tiene en cuenta los niveles de emisión de intensidad sonora medidos, figura 6.26. La causa de este elevado nivel de energía modal se debe a que el campo sonoro generado tiene su origen en un patrón de ruido rosa y la energía a 160 Hz se divide por un número pequeño de modos. Como era de esperar, en la medida que aumenta la frecuencia, el número de modos presentes en cada banda de tercio de octava también lo hace. Como la energía aportada por el ruido rosa es prácticamente la misma para cada banda, la energía modal tiene que disminuir necesariamente con la frecuencia.

Considerando la distribución de la energía modal de la probeta de acero (M5), es de esperar que la vibración de ésta sea elevada a baja frecuencia. El espectro de vibración de la probeta obtenido por AUTOSEA2 se puede analizar observando la figura 6.37, donde se aprecia que el mayor nivel de vibración se obtiene en la banda de 160 Hz. El efecto de la excitación de los modos de vibración de frecuencia más baja explica en parte esta circunstancia. Otro factor determinante es la ley de masa que pone de manifiesto que el Índice de Reducción Sonora (R) aumenta con la densidad superficial y con la frecuencia.

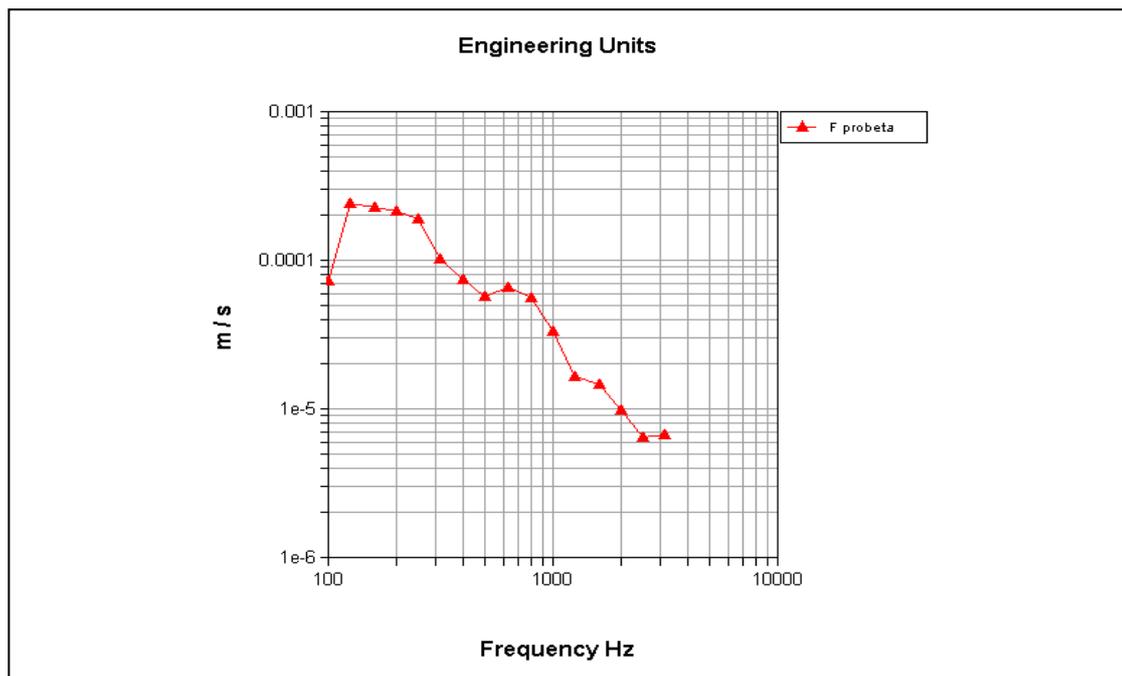


Figura 6.37- Espectro de vibración de la probeta de acero (M5) en tercios de octava.

El método SEA no permite estimar con precisión las frecuencias naturales de una placa, pero si determinar aquellas bandas de frecuencia donde es previsible que el subsistema en estudio tenga un nivel de vibración medio mayor.

6.7.3.-Resultados estimados para la presión sonora

Una parte de la energía vibratoria de la probeta se transmite al aire próximo convirtiéndose en una onda sonora que se propaga en condiciones de campo libre. El nivel sonoro que estima AUTOSEA2 se corresponde con la presión sonora, sin embargo, el nivel obtenido de forma experimental es de intensidad sonora. Estos dos niveles son equiparables en condiciones de campo libre, ya que la diferencia entre ambos en dichas condiciones se puede considerar despreciable como se puso de manifiesto en el apartado 3.2.4. Dado que el valor de intensidad sonora ha sido validado, cumpliendo lo especificado en la norma UNE EN ISO 9614 partes 2 y 3, se puede considerar que el nivel de intensidad sonora medido se corresponde con el nivel de presión sonora en condiciones de campo libre estimado por el software. En la figura 6.38 se muestra el espectro del nivel de presión sonora en el punto de medida definido en el modelo. Dicho punto se encuentra a la misma distancia de la probeta que la superficie virtual de barrido definida para realizar las medidas con la sonda de intensidad sonora.

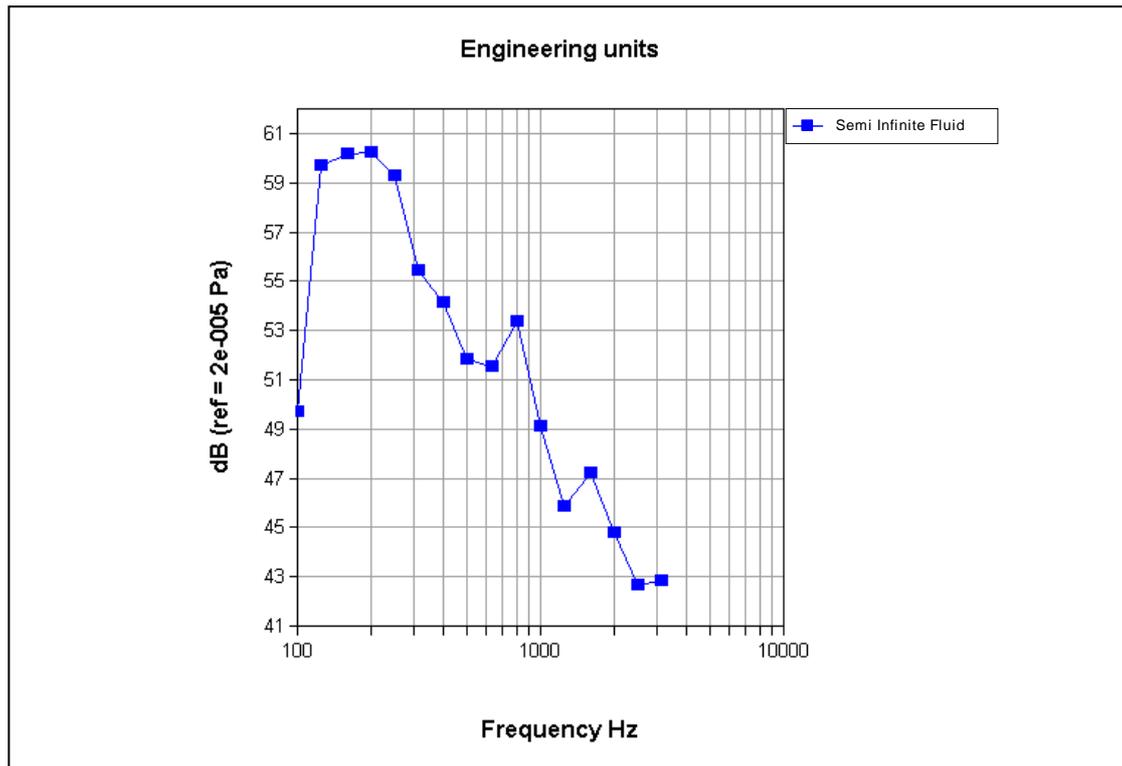


Figura 6.38- Espectro de presión sonora en tercios de octava estimado por AUTOSEA2 para la probeta de acero (M5).

Como se aprecia en la figura 6.38, el mayor nivel de presión sonora se encuentra en la zona de baja frecuencia donde la probeta de chapa de acero (M5) posee el mayor nivel de vibración, véase figura 6.37. Así mismo, en el rango de las frecuencias medias, existe un pequeño pico que también se detecta en el espectro de vibración mencionado anteriormente.

6.7.4.-Comparación entre niveles sonoros estimados y medidos.

Una forma de valorar la eficacia de AUTOSEA2 como software para predicciones en vibroacústica, consiste en comparar los valores obtenidos por medio de una técnica experimental consolidada y normalizada, como es el caso de la intensimetría acústica, con los valores que el software estima. Los resultados que se muestran en la presente tesis son la consecuencia de un proceso de ajuste entre la teoría y la práctica, es decir, entre el modelo matemático definido por la teoría del Análisis Estadístico de Energía (SEA) y las medidas experimentales realizadas con la sonda de intensidad sonora. Inicialmente existía un desajuste entre los valores estimados por el software y los valores medidos con la sonda, haciendo inviable la comparación entre teoría y práctica.

Las medidas modales son decisivas para determinar el amortiguamiento de la probeta de acero (M5) en función de la frecuencia. Una vez determinado este parámetro e introducido en el modelo, el ajuste obtenido se puede considerar aceptable. En la figura 6.39 se compara el Índice de Reducción Sonora (R) estimado por AUTOSEA2 y el medido con la sonda de intensidad sobre la probeta de chapa de acero (M5).

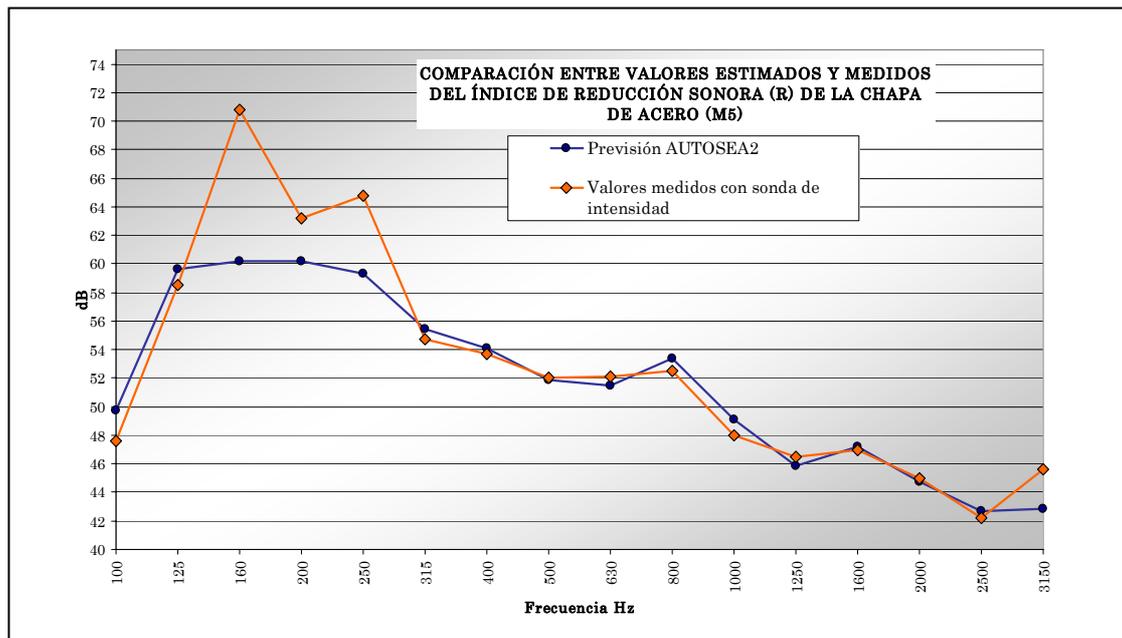


Figura 6.39- Comparativa entre los niveles sonoros estimados por AUTOSEA2 y los medidos por medio de la sonda de intensidad sonora de la marca comercial B&K para la probeta de chapa de acero (M5).

Como se aprecia el ajuste para media y alta frecuencia es muy bueno, pero a bajas frecuencias el desajuste es considerable. Esto es debido a la poca precisión que posee el software cuando no existe un solapamiento modal adecuado. Circunstancia que se suele dar en general en placas a baja frecuencia. Aunque pueda parecer que el resultado global entre la realidad medida y la estimación de AUTOSEA2 no es bueno, habría que considerar la no despreciable precisión obtenida con el modelo ajustado a frecuencias medias y altas, zona del espectro donde los programas de elementos finitos o de elementos de contorno no son tan precisos o generan un coste computacional importante.

Sin embargo, si tenemos en cuenta los valores del Índice de Reducción Sonora (R) obtenidos para la probeta combinada de chapa de acero (M5) y poliuretano (M6), el desajuste aumenta ligeramente a altas frecuencias, véase la figura 6.40.

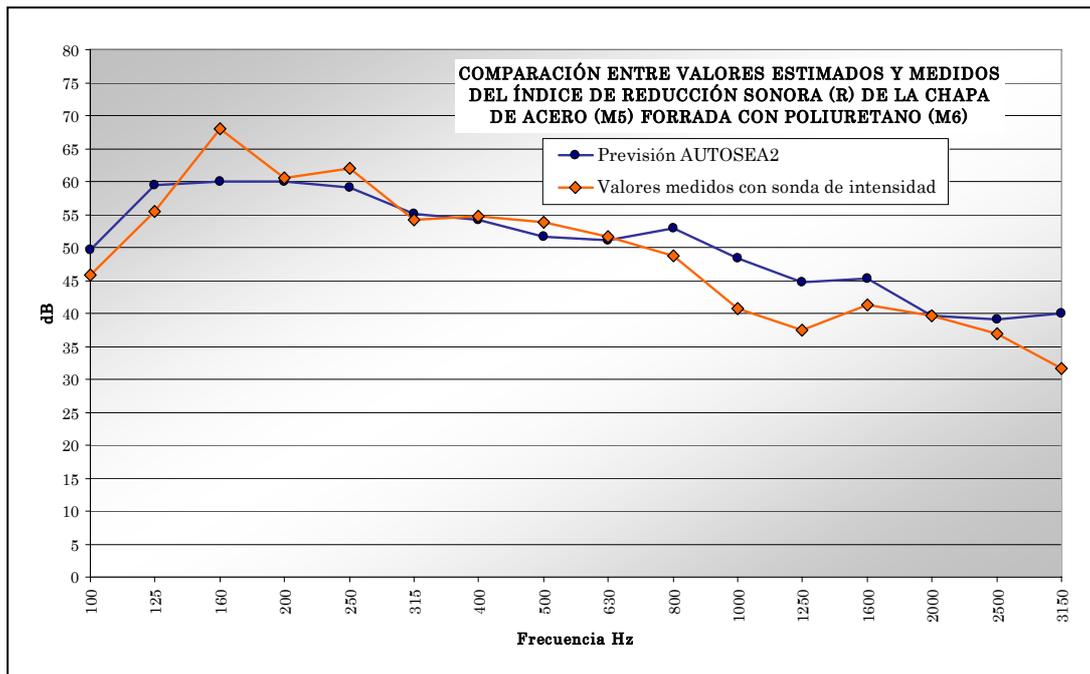


Figura 6.40- Comparativa entre los niveles sonoros estimados por AUTOSEA2 y los medidos por medio de la sonda de intensidad sonora de la marca comercial B&K, para una probeta combinada de chapa de acero (M5) y poliuretano (M6).

Finalmente, comentar que en la creación del modelo no se han realizado demasiadas simplificaciones, siendo bastante fiel a la estructura en forma de caja construida para montar las probetas y realizar las medidas con la sonda de intensidad. Tan solo se han alterado los dos cerramientos laterales, considerándose cada uno de ellos como la unión de dos subsistemas diferentes del mismo material en vez de uno solo. No obstante, a efectos de transmisión de la energía se han considerado rígidamente unidos. Esta simplificación era necesaria para poder delimitar como dos cavidades acústicas diferentes, la fuente sonora y el pequeño volumen que existe entre ésta y la probeta.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

Para alcanzar los objetivos planteados en el capítulo 1 de esta tesis, ha sido necesario construir una estructura con forma de paralelepípedo donde situar las probetas objeto de ensayo, validándose las medidas de intensidad sonora según lo establecido en la norma UNE EN ISO 9614, partes 2 y 3. Como los ensayos que se realizan para definir la capacidad aislante de un material se llevan a cabo para un ancho de banda de 100 Hz a 3,15 kHz, se ha diseñado un nuevo separador de micrófonos que abarque todo el rango de frecuencia. Dicho separador ha sido construido de baquelita con un diámetro de media pulgada.

Se han obtenido los índices de reducción sonora de seis probetas, cinco de materiales de baja densidad superficial y una de acero. Además, para la probeta de acero se han determinado sus parámetros modales, con la finalidad de elaborar un modelo matemático que ayude a explicar su comportamiento desde el punto de vista de la vibroacústica. Para los ensayos modales se ha diseñado un martillo, a partir de un transductor de fuerza, que permite obtener la función de transferencia que relaciona la velocidad de la vibración con la fuerza de excitación, es decir, la movilidad del sistema.

Por último, se ha utilizado un software basado en el Análisis Estadístico de Energía (SEA) para modelizar la estructura de ensayo, incluyendo la probeta de acero. Los resultados medidos por intensimetría acústica se han comparado con los resultados estimados por el software comercial AUTOSEA2LT, apreciándose las

limitaciones de estimación de resultados del software a bajas frecuencias, así como las ventajas aportadas a medias y altas frecuencias.

7.1.- Conclusiones generales

En primer lugar se ha conseguido realizar todas las medidas de intensidad sonora con el separador diseñado. Se ha demostrado que la incertidumbre de la medida aumenta por debajo de los 100 Hz debido al error originado por el desajuste de fase de la cadena de medida, haciéndose más evidente este error cuanto mayor es la densidad superficial de la probeta objeto de ensayo, es decir, cuanto menor es la amplitud de intensidad transmitida al otro lado de la probeta.

Con respecto a la incertidumbre de medida a alta frecuencia, debida al error originado en la aproximación por diferencias finitas, se han obtenido idénticos resultados a los publicados por F. Jacobsen y V. Cutanda [43], respecto a la extensión del ancho de banda a alta frecuencia, donde el error originado en la aproximación por diferencias finitas es compensado con el error cometido al interferir físicamente los micrófonos en el campo sonoro.

En segundo lugar se ha logrado validar las medidas teniendo en cuenta los criterios de repetibilidad de los barridos, índice de capacidad dinámica y la diferencia de niveles medidos con la sonda en posición normal e invertida.

Respecto de la repetibilidad, se han validado todas las medidas aplicando la parte 2 de la norma UNE EN ISO 9614. Si se toma como referencia la parte 3 de dicha norma, se ha conseguido validar al menos una medida para cada probeta. Cumplir el criterio de repetibilidad de la parte 3 de la norma UNE EN ISO 9614 implica que la precisión de los resultados obtenidos es máxima y se estima en 0,5 dB.

La validación del criterio relacionado con el índice de capacidad dinámica se ha logrado sin dificultad para el ancho de banda comprendido entre los 100 Hz y los 3,15 kHz. En cuanto al cumplimiento de la diferencia de medida con la sonda en posición normal e invertida, también se puede considerar conseguido, aunque con un margen pequeño en las frecuencias más bajas.

En tercer lugar, se puede afirmar que una vez cumplidos todos los criterios de validación anteriores, se ha establecido un procedimiento de ensayo novedoso y

relativamente sencillo para obtener el Índice de Reducción Sonora (R) de cualquier material aislante con baja densidad superficial. El ensayo de este tipo de materiales, por medio de probetas montadas sobre la estructura en forma de caja, es una alternativa válida a la medida en salas especialmente acondicionadas que cumplan los requisitos definidos en la norma UNE EN ISO 140 parte 1. Normalmente los materiales de baja y media densidad superficial, que pueden considerarse como aislantes acústicos, no suelen ensayarse de forma individual sino como parte de un mamparo compuesto. Los fabricantes de máquinas que requieren de cerramientos aislantes, necesitan conocer el Índice de Reducción Sonora (R) de los materiales que les ofrecen sus proveedores para poder seleccionarlos. El procedimiento de ensayo utilizado en el desarrollo de esta tesis, permite caracterizar desde el punto de vista del aislamiento acústico, el comportamiento de estos materiales de baja densidad superficial con rapidez y precisión.

Finalmente, por medio del software comercial AUTOSEA2 LT, se ha estimado la intensidad acústica transmitida a través de la probeta de acero, consiguiéndose una aproximación aceptable entre los valores medidos con la sonda de intensidad y los resultados estimados por el software. Tan solo a baja frecuencia, como era previsible, se comete un error excesivo. Sin embargo, a media y alta frecuencia el resultado se puede considerar ajustado. La estimación de resultados es aceptable, cuando en el modelo de la estructura de ensayo realizada con AUTOSEA2 LT, han sido introducidos algunos parámetros modales de la probeta de acero, tales como sus frecuencias naturales y el amortiguamiento correspondiente a cada una de ellas, valores que han sido determinados experimentalmente.

7.2.- Conclusiones específicas

Los ensayos se han realizado sobre probetas de materiales concretos cuyas características físicas están totalmente definidas. En este apartado de conclusiones, solamente se mencionan aquellos aspectos que están relacionados con las probetas ensayadas y no con la metodología empleada.

De todos los materiales ensayados, el mejor comportamiento en todo el ancho de banda se corresponde con la probeta de acero (M5). Esta probeta es la única de las ensayadas que no se puede calificar como material de baja densidad superficial, su comportamiento sigue la ley de masa. En las bandas de tercio de octava de 160 Hz y

250 Hz se incluyen dos de los primeros modos a flexión de la probeta, siendo en estas frecuencias donde la probeta manifiesta su peor comportamiento como aislante. En principio, y según la ley de masa, se puede calcular la atenuación de la onda sonora a dichas frecuencias, pero en la práctica el fenómeno físico de la resonancia aumenta la energía sonora radiada por la probeta viéndose disminuida su capacidad como aislante. La modelización realizada con AUTOSEA2 LT tiene en cuenta la existencia de modos propios en las bandas de frecuencia de 160 Hz y 250 Hz, pero no es capaz de estimar la amplitud debido al bajo solapamiento modal. No obstante, utilizando las herramientas que posee el software para visualizar los caminos de transmisión de los flujos de energía vibroacústica a la frecuencia de 160 Hz, se muestra como la energía de la fuente incide directamente sobre la probeta de acero, siendo ésta la que mayor cantidad de energía acústica radia hasta el punto de medida.

Con respecto al resto de materiales ensayados, el mejor comportamiento como material aislante, es decir mejor Índice de Reducción Sonora (R), se corresponde con la lana de roca (M4 y M3), con y sin revestimiento. La lana de roca es el material aislante más utilizado en aplicaciones de aislamiento de máquinas, así como en el sector de la edificación. Evidentemente los resultados obtenidos justifican su uso generalizado. Por otra parte, la probeta de caucho sintético (M2) es muy adecuada para aplicaciones de aislamiento a alta frecuencia. A partir de los 1000 Hz mejora ligeramente los resultados obtenidos con respecto a las probetas de lana de roca, aunque a baja y media frecuencia su comportamiento es pobre de acuerdo con su menor densidad superficial.

Para el resto de probetas ensayadas, constituidas por materiales de baja densidad, su Índice de Reducción Sonora (R) es muy bajo para un producto que se supone debe actuar como material aislante. Realmente, tanto el polietileno (M1) como el poliuretano (M6), no son materiales aislantes sino absorbentes. El uso de estos tipos de materiales como elementos de protección frente al ruido en máquinas, tiene que ver con la confusión derivada de considerar que los materiales con alto coeficiente de absorción también poseen un elevado Índice de Reducción Sonora (R).

Por último, con respecto al análisis modal, se ha conseguido una excitación lineal aceptable mediante un martillo diseñado a partir de un simple transductor de fuerza en el rango de frecuencia de los 100 Hz a los 3,15 kHz. También se ha podido comparar la Función de Respuesta en Frecuencia (FRF), conocida como movilidad,

con el espectro de intensidad sonora. Las frecuencias donde la estructura tiende a moverse al ser excitada por un impacto, son las mismas a las que se radia la energía sonora, como era de esperar.

7.3.- Desarrollos futuros

La Vibroacústica, como tal, es una parcela del conocimiento científico pendiente de desarrollarse en múltiples direcciones. Desde hace siglos se han estudiado los fenómenos relacionados con el sonido o con las vibraciones como si fueran dos realidades distintas. Hace poco más de un siglo, Lord Rayleigh estableció los principios de la acústica moderna, generalizando en términos de energía los aspectos que conciernen a la naturaleza del sonido y de la vibración. Realmente ambos fenómenos se pueden considerar uno solo, las diferencias se derivan del medio en el que se propaga la onda.

La medida de la impedancia acústica para materiales de densidad homogénea, es una de las posibles líneas de desarrollo de esta tesis, una vez que se ha establecido un procedimiento de ensayo fiable para la medida de la intensidad sonora transmitida a través de una probeta. Dichos ensayos podrían realizarse excitando la probeta directamente por medio de un elemento vibrante o por medio de una fuente sonora calibrada. Conocida la excitación, independientemente de cual sea su origen, y medida simultáneamente la intensidad sonora transmitida, puede establecerse un balance de energía que permita determinar de forma experimental la eficiencia a la radiación sonora en probetas de diversos materiales y espesores.

Otro campo de posible desarrollo es la aplicación del principio de reciprocidad para la identificación de los caminos de transmisión de los flujos de energía vibroacústica generados en el interior de la estructura, como paso previo a su aplicación en máquinas complejas. El principio de reciprocidad en vibroacústica fue formulado hace más de un siglo, pero aún en la actualidad existen aspectos susceptibles de ser investigados desde el punto de vista experimental. La estructura de ensayo construida, el procedimiento de medida establecido, junto a una fuente sonora con la que se pueda determinar la velocidad volumétrica de una onda generada a voluntad, permitiría aplicar dicho principio y, por lo tanto, el desarrollo de un procedimiento fiable de ensayo para identificar los caminos de transmisión de la energía vibroacústica.

Por último, teniendo en cuenta el conocimiento adquirido en la medida de la intensidad sonora, es posible proceder de forma análoga con la medida de la intensidad vibratoria en un material de densidad homogénea. No existe una extrapolación evidente de los principios y parámetros relacionados con la intensidad acústica, que pueda hacer fácil su aplicación. Pero sí se ha comprobado experimentalmente, aunque no recogido en esta tesis, que la medida de la onda vibratoria generada sobre la probeta de acero utilizando dos acelerómetros permite obtener la dirección en la que se encuentra la fuente de vibración. En el futuro podría desarrollarse un sistema de medida de intensidad vibratoria que permitiese determinar la energía transmitida a través de la junta de unión de dos elementos estructurales, por ejemplo, en uniones soldadas, atornilladas, etc.

En cuanto a la utilización de AUTOSEA2 LT, se ha comprobado que aporta buenos resultados a media y alta frecuencia, es decir, por encima de los 500 Hz. En la actualidad, la empresa que desarrolla el software ofrece la posibilidad de conectar el modelo con varios programas de elementos finitos comerciales, mejorando los resultados estimados por AUTOSEA2 LT a baja frecuencia. El manejo de esta nueva herramienta permitirá una modelización más completa y exacta de los sistemas, obteniéndose resultados más ajustados.

REFERENCIAS

- [1] ÁLVAREZ, J.D.; JACOBSEN, F. (2007). In Situ Measurements of the Complex Acoustic Impedance of Porous Materials. Inter-Noise 2007.
- [2] ANDREE, C. A. (1931) Acoustometer. United States Patent Office. Número de patente 1,812,030.
- [3] BEISSNER, K. (1982). On the Plane-Wave Approximation of Acoustic Intensity. Journal of the Acoustic.
- [4] BENDAT, J.S.; PIERSOL, A (1986). Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Wiley.
- [5] BENDAT, J.S.; PIERSOL, A.G. (2002). Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. John Wiley & Sons.
- [6] BOLT, R.H.; PETRAUSKAS, A.A. (1943) An Acoustic Impedance Meter for Rapid Field Measurements. The Journal of the Acoustic Society of America. Vol. 15 (79).
- [7] CHUNG, J.Y. (1978). Cross-spectral Method of Measuring Acoustic Intensity without Error Caused by Instrument Phase Mismatch. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 64 (1613-1616).
- [8] CRAINK, R.J. (1996). Sound Transmission Through Buildings Using Statical Energy analysis. Gower Publishing-Ltd.
- [9] CRAMER, O. (1993). The Variation of the Specific Heat Ratio and the Speed of Sound in Air with Temperature, Pressure, Humidity and CO₂ Concentration. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 93 (2510-2516).
- [10] CROCKER, M.J. (1997). Encyclopedia of Acoustics. John Wiley & Sons.

- [11] CROCKER, M.J.; ARENAS, J.P. (2004). Identification of Noise Sources on a Residential Split-System Air-Conditioner Using Sound Intensity Measurements. *Applied Acoustics*. Vol. 65 (545-558)
- [12] DE BREE, H-E. (2001). *The Microflown*. ISBN 9036515793.
- [13] DE BREE, H-E. y otros (2004). Sound Intensity Measurements with the Microflown Sensor. *Inter-Noise 2004*.
- [14] DE BREE, H-E. y otros (2005). Vehicle Acoustic Synthesis Method: Improving Acquisition Time by Using p-u Probes. SAE Interntional.
- [15] DE BREE, H-E.; DRUYVESTYEN, W.F. (2005). A Particles Velocity Sensor to Measure the Sound from a Structure in the Presence of Background Noise. *Forum Acousticum (Budapest-2005)*.
- [16] DE BREE, H-E.; SVETOVOY, V.B.; VISSER, R. (2005). An Introduction to Very Near Field Holography. SAE 2005.
- [17] DRUYVESTYEN, W.; DE BREE, H. (2000). A Novel Sound Intensity Probe; Comparison with the Pair of Pressure Microphones Intensity Probe. *Journal of de Audio Engineering Society*. Vol. 48 (49-56).
- [18] DRUYVESTYEN, W.F.; RAANGS, R. (2005). Scanning the Sound Field from Uncorrelated Sources. *Forum Acusticum (Hungary-2005)*.
- [19] EERDEN, F.J.; DE BREE H-E.; TIJDEMAN, H. (1998). Experiments with a New Acoustic Particle Velocity Sensor in an Impedance Tube. *Sensors and Actuators A-Physical*. Vol. 62 (1057-1059).
- [20] FAHY, F.J. (1977). Measurement of Acoustic Intensity Using the Cross-spectral Density of two Microphone Signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 64 (1613-1616).
- [21] FAHY, F.J. (1987). *Sound and Structural Vibration*. Academia Press.
- [22] FAHY, F.J. (1994). Statistical Energy Analisys: A Critical Overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Vol A346 (429-552).
- [23] FAHY, F.J. (1995). *Sound Intensity*. E & F N Spon.
- [24] FAHY, F.J. (1995). *Sound Intensity*. London UK, E&FN Spon.

- [25] FAHY, F.J. (1997). International Standards for the Determination of Sound Power Level of Sources Using Sound Intensity Measurement. *Applied Acoustics*. Vol. 50 (97-109).
- [26] FAHY, F.J.; WALKER, J.G. (1998). *Fundamentals of Noise and Vibration*. E & F N Spon.
- [27] FAHY, F.J. (2001). *Foundations of Engineering Acoustics*. Academia Press.
- [28] FAHY, F.J. (2002). Some Applications of the Reciprocity Principle in Experimental Vibroacoustics. *Acoustical Physics*. Vol 49(2) (217-229).
- [29] GADE, S. (1982). Sound Intensity (Theory). *Technical Review* (nº3) (5-39).
- [30] GADE, S. (1985). Validity of Intensity Measurements. *Technical Review* (nº 4) (3-18).
- [31] GAMEIRO DA SILVA, M.C. (2002). Measurements of Comfort in Vehicles. *Measurement Science and Technology*. Vol. 13 (41-60).
- [32] GINN, K.B.; HALD, J. (1989). STSF-Practical Instrumentation and Application Digital Filter Analysis. Real-time and non Real-time Performance. *B&K Technical Review* nº2.
- [33] HALD, J. (2005). An Integrated NAH / Beamforming Solution for Efficient Broad-Band Noise Source Location. SAE International.
- [34] HALLMAN, D.; BOLTON, J.S. (1992). Multi-reference Nearfield Acoustical Holography. *Inter-Noise 92*.
- [35] HONSCHOTEN, J.W.(2004). Modelling and Optimisation of the Microflown. Master's Thesis.
- [36] HONSCHOTEN, J.W.; DRUYVESTYEN, W.F.; KUIPERS, H.; KRIJNEN, G.J. (2004). Noise Reduction in Acoustic Measurements with Particles Velocity Sensor by Means of a Cross-correlation Technique. *Acta Acustica United with Acustica*. Vol. 90 (349-355).
- [37] International Electrotechnical Commission. Measurement Microphones, part 2. Primary Method for the Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by Reciprocity Method. IEC 61094-2 (1992).
- [38] ISO 15186-1 (2000). Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements Using Sound Intensity. Laboratory Measurements.
- [39] JACOBSEN, F. (1991). A Simple and Effective Correction for Phase Mismatch in Intensity Probes. *Applied Acoustics*. Vol. 33 (165-180).

- [40] JACOBSEN, F. (1991). Phase Mismatch Error and Related Indicators in Sound Intensity Measurement. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 149(2) (341-347).
- [41] JACOBSEN, F. (1994). A Note on the accuracy of Phase Compensated Intensity Measurements. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 174(1) (140-144).
- [42] JACOBSEN, F. (1997). An Overview of the Sources of Error in Sound Power Determination Using the Intensity Technique. *Applied Acoustics*. Vol. 50(2) (155-166).
- [43] JACOBSEN, F.; CUTANDA, V.; JUHL, P.M. (1998). A Numerical and Experimental Investigation of the Performance of Sound Intensity Probes at High Frequencies. *Journal of the Acoustical Society of America* (103) (953-961).
- [44] JACOBSEN, F. (2002). A Note on Finite Difference Estimation of Acoustic Particle Velocity. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 256(6) (849-859).
- [45] JACOBSEN, F.; DE BREE, H-L. (2004). A Comparison of p-p and p-u Sound Intensity Measurement Systems. Eleventh International Congress on Sound and Vibration. (Russia-2004).
- [46] JACOBSEN, F.; DE BREE, H-E. (2005). A Comparison of Two Different Sound Intensity Measurement Principles. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 118 (1510-1517).
- [47] JACOBSEN, F.; DE BREE H-E. (2005). Measurement of Sound Intensity, p-u Probes versus p-p Probes. (France-2005).
- [48] JACOBSEN, F. y otros (2005). Intensity-based Sound Power Determination under Adverse Sound Field Conditions. p-u Probes versus p-p Probes. ISCV12 (Lisbon-2005).
- [49] JACOBSEN, F.; LIU, Y. (2005). Near Field Acoustic Holography Based on an Array of Particles Velocity Sensors. Inter-Noise 2005.
- [50] JACOBSEN, F.; DE BREE, H-E. (2005). A Comparison of Two Different Sound Intensity Measurement principles. JASA 2005.
- [51] JACOBSEN, F. (2007). Statistically Optimized Near Field Acoustic Holography Using an Array of pressure-velocity probe. JASA 2007
- [52] KIM, Y.J.; BOLTON, J.S.; KWON, H.S. (2004). Partial Sound Field Decomposition in Multireference Near-field Acoustical Holography by Using Optimally Located Virtual References. *JASA*. Vol. 115 (1641-1652).

- [53] JANZEN, P.C. (1995). Calibration and Validation of an Interfacial Acoustic Intensity Probe. Master's Thesis. University of Pennsylvania. USA.
- [54] KAHANA, Y. y otros (2005). An Optical 3D Dound Intensity and Energy Density Probe. Proceeding of Acoustics (Austrlia 2005).
- [55] KAISER, J.F. (1962). Normalized Sound Control System. United States Patent Office. Número de patente 3,057,960.
- [56] LYON, R.H.; DEJONG, R.G. (1995). Theory and Application of Statical Energy Analysis. Butterworth-Heinemann.
- [57] MAYNARD, J.D.; WILLIAMS, E.G.; LEE, Y. (1985). Nearfield Acoustic holography. Theory of Generalized Holography and Development of NAH. Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 78 (1395-1413).
- [58] MICHAEL, P.L. y otros (1963). Industrial Noise Hazard Meter. United States Patent Office. Número de patente 3,089,561.
- [59] MORFEY, C.L. (2001). Dictionary of Acoustics. London. Academic Press.
- [60] MUNUERA, G.;VALVERDE A. (2002). Aplicación de Técnicas de Intensimetría Acústica para la Determinación del Ruido Aerodinámico Transmitido al Habitáculo de un Vehículo Automóvil. XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (Cádiz).
- [61] MUNUERA, G.;VALVERDE A.; ZAMORA C. (2003). Procedimiento Alternativo para Medidas Estandarizadas de Aislamiento de Materiales Acústicos en Laboratorio a partir de la Medida de la Intensidad Sonora y su Validación. VI Congreso Ibero-Americano de Ingeniería Mecánica (Coimbra-Portugal).
- [62] MUNUERA, G.;VALVERDE A. (2003). Determinación de Potencia Sonora e Identificación de Fuentes de Ruido en Grupos Electrógenos a partir de la Medida de la Intensidad Sonora en Campo Libre. VI Congreso Ibero-Americano de Ingeniería Mecánica (Coimbra-Portugal)
- [63] MUNUERA, G.;VALVERDE A. (2008). Determinación del Índice de Reducción Sonora de Materiales Aislantes de Aplicación Industrial Mediante Medidas de Intensidad Acústica. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (Gijón).
- [64] OLSON, H. F. (1932) System Responsive to the Energy Flow of Sound Waves. Número de patente 1,892,644.

- [65] OLSON, H.F. (1974).Field-type Acoustic Wattmeter. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 55 (70).
- [66] PIERCE, A.D. (1989). Acoustics, An introduction to its Physical Principles and Applications. Acoustical Society of America.
- [67] RAANGS, R.; DRUYVESTYEN, W.F.;DE BREE H-E. (2001). A Low Cost Intensity Probe. Audio Engineering Society (Netherlands 110 th Convention).
- [68] RAANGS, R.; DRUYVESTYEN, W.F.;DE BREE H-E. (2001). A Novel Two-Dimensional Sound Particles Velocity Probe for Source Localization and Free Field Measurements in a Diffuse Field. Inter.Noise (Germany 2001).
- [69] RAANGS, R.; DRUYVESTYEN, W.F.;DE BREE H-E. (2002). Sound Source Localization Using Sound Intensity Measured by a Three-Dimensional p-u Probe. Audio Engineering Society 112th Convention.
- [70] RAANGS, R. (2005).Exploring the Use of the Microflown. ISBN 90-365-2285-4.
- [71] RANDALL, R.B. (1987). Frecuency Analisys. Brüel & Kjaer.
- [72] RASSMUSSEN, P. (1988). Source Location Using Vector Intensity Measurements. 2nd International Conference on Methodology and Innovations in Automotive Experimentation (72-84).
- [73] RAYLEIGH, J.W.S. (1945). Theory of Sound. Dover.
- [74] RONDEAU, J.F.; DUVAL, A.; DESHAYES, G. LASSALAS, M. DE BREE, H-E.; CHAIGNE, S. (2005). Vehicle Acoustic Synthesis Method. Improving Acquisition Time by Using p-u Probes. Noise &Vibration.
- [75] ROOZEN, N.B.; SHOLTE, R. (2003). On the Direct Propagation of Sound Intensity using Cross-spectral NAH. Tenth International Congress on Sound and Vibration.
- [76] SHULTZ, T.J. (1958). Acoustic Watimeter. United States Patent Office. Número de patente 2,836,656.
- [77] UNE EN ISO 9614-1 (1995). Determinación de los Niveles de Potencia Acústica de las Fuentes de Ruido a Partir de la Intensidad. Medida en Punto Discretos.
- [78] UNE EN ISO 9614-2 (1997). Determinación de los Niveles de Potencia Acústica de las Fuentes de Ruido a Partir de la Intensidad. Medición por Barrido.

- [79] UNE EN ISO 9614-3 (2003). Determinación de los Niveles de Potencia Acústica de las Fuentes de Ruido a Partir de la Intensidad Sonora. Método de Precisión para la Medición por Barrido.
- [80] TAYLOR, K.J. (1976). Absolute Measurement of Acoustic Particles Velocity. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 69 (691-694).
- [81] TIJDEMAN, H. (1975). On the Propagation of Sound Waves in Cylindrical Tube. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 39 (1-33).
- [82] VERHEIJ, J.W. (1992). Experimental Procedures for Quantifying Sound Paths to the Interior of Road Vehicles. 2nd International Conference on Vehicle Comfort. Part. 1 (483-491).
- [83] VISSER, R. (2002) Inverse Source Identification Based on Acoustic Particle Velocity Measurements. *Inter-Noise 2002*.
- [84] VISSER, R. (2003) Acoustic Source Localization Based on Pressure and Particle Velocity Measurements. *Inter-Noise (Corea-2003)*.
- [85] VISSER, R. (2004). A Boundary Element Approach to Acoustic Radiation and Source Identification. Master's Thesis University of Twente.
- [86] WENTE, E. C. (1922) The Sensitivity and Precision of the Electrostatic Transmitter for Measuring Sound Intensities. *Physical Review*, 19 (498-503).
- [87] WEYNA, S. (2005). Application of Microflow Probe to Visualization of Acoustic Power Flow. *Polish-Scandinavian Structured Conference on Acoustic*. (Poland-2005).
- [88] WEYNA, S. (2005). Microflow Based Identification of Vortex Shedding in the Space of Real Acoustic Flow Fields. *Twelfth International Congress on Sound and Vibration*. (Lisbon-2005).
- [89] WEYNA, S. (2006). *The Shapes of Sound, Acoustic Wave Flow Visualisations in a Real Medium*. ISBN 83-60140-58-8.
- [90] WILLIAMS, E.G. (1999). *Fourier Acoustics. Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*. Academic Press.
- [91] WOLFF, I. (1932). System Responsive to the Energy Density of Sound Waves. United States Patent Office. Número de patente 1,892,646.

- [92] WOLFF, O.; SOTTEK, R. (2004). Binaural Panel Noise Contribution Analysis-An Alternative to the Conventional Window Method. (Francia-2004).
- [93] ZIEL, A. (1954). Noise in Measurements. Prentice Hall.
- [94] ZYL, B.G.van (1974). Bepaling van Klankdrijving met behulp van een Klankintensiteitsmeter. Master's Thesis, University of Pretoria. Republic of South Africa.
- [95] ZYL, B.G.van; ANDERSON, F. (1975). Evaluation of the Intensity Method of Sound Power Determination. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 57 (682-686).
- [96] ZYL, B.G.van; ERASMUS, P.J. (1985). Application of Sound Intensimetry to the Determination of Sound Reduction Indices in the Presence of Flanking Transmission. Proceedings of 2nd International Congress on Acoustic Intensity (555-559).
- [97] ZYL, B.G.van; ERASMUS, P.J.; ANDERSON, F. (1987). On the Formulation of the Intensity Method for Determining Sound Reduction Indices. Applied Acoustics. Vol. 22 (213-228).