



Aislamiento a ruido aéreo entre locales. Estimación de la incertidumbre de medida

PROYECTO FIN DE CARRERA

I.T.T. Sonido e Imagen

Autor: Borja Pendán Rebollo
Tutor: Luis A. Azpicueta Ruíz

Mayo, 2011

Aislamiento a ruido aéreo entre locales. Estimación de la
incertidumbre de medida.

Autor: *Borja Pendán Rebollo*

Tutor: *Luis Antonio Azpicueta Ruíz*

EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ____ de _____ de
20 ____ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid,
acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

... Dedicado a mis padres, mi novia, mi hermana y mis amigos, quienes me han dado todo su apoyo y comprensión tanto en los momentos dulces como amargos de la elaboración de este proyecto, haciendo más llevadera esta ardua tarea.

Agradecimientos

Mucho tiempo ha pasado ya desde que comencé mis estudios de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, en la rama de Sonido e Imagen. Son casi diez años los que llevo dedicados al estudio del sonido en general, si contamos los dos años que dediqué a obtener el título de Técnico Superior de Sonido en la actual Formación Profesional.

Poco conocía de acústica cuando entré en la Escuela. Sabía de grabación musical, de postproducción de audio, de edición de video y de sonorización de eventos, pero no de acústica... era mi asignatura pendiente. Por suerte o por desgracia, en la formación profesional, no resultó ser lo más interesante para los profesores que tenían encomendado formarnos como futuros técnicos de sonido. A su parecer, esa faceta era únicamente competencia de ingenieros...

Pues dicho esto, cualquiera puede hacerse una idea del motivo de mi proyecto, y aún más claro, el de mi ingreso en la Universidad Carlos III.

Durante los años que llevo aquí, he cursado varias asignaturas relacionadas con la acústica. Menos de las que me hubiese gustado, pero suficientes para plantearme la posibilidad de desarrollar mi vida profesional dedicada a ella.

En este tiempo he sido alumno de muchos profesores, de asignaturas que me han encantado y de otras que he detestado... Sin embargo, siempre ha habido una persona que me ha fascinado, en cualquiera de las materias que ha impartido. Esta persona, como era de esperar, es mi tutor. Desde la primera asignatura que cursé con él, tuve muy claro que quería que fuese quien llevase mi proyecto fin de carrera. Luis representaba y representa, todo lo que me gusta de un profesor: sabiduría, docencia y entrega. Nunca antes había conocido a una persona que poseyera tantos conocimientos sobre lo que a mi más me gustaba y los impartiera con la mayor ilusión, interés y mimo con lo que lo hace Luis. Sabía que tenía que ser él. Daba igual la materia a tratar, siempre que tuviera relación con el sonido en general. Cualquiera sería bien recibida para comenzar mi proyecto fin de carrera como colofón de mi estancia en la universidad.

Pues bien, dicho esto, en cuanto pude comenzar a buscar un proyecto fin de carrera, contacté con Luis. Tuve que esperar unos meses prudenciales a que pudiera llevar mi proyecto, pero la espera mereció la pena... Me propuso realizar un modesto análisis de algunas ideas que se encontraban en relación con el aislamiento acústico de recintos. Era una materia que cursé en la asignatura de Ingeniería Acústica, la cual siempre me resultó muy interesante, y para la que mi tutor sabía que podía extender mis conocimientos aportando algo nuevo a la misma mediante la elaboración de mi proyecto fin de carrera.

Por lo tanto, tras esta retahíla de anécdotas, vivencias y sinceridades, queda clara la motivación de mi proyecto fin de carrera, sin la cual, nunca hubiera sido posible embarcarme en esta aventura.

Resumen

Este documento trata de analizar la incertidumbre de medida asociada a la realización de un ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales. Para ello, se calcula la incertidumbre de medida que introduce cada una de las diferentes magnitudes medibles que definen los distintos índices de valoración de aislamiento a ruido aéreo entre locales.

Previamente, se define el concepto conocido como incertidumbre de medida en líneas generales y se ilustra un ejemplo sencillo para que el lector que desconozca el término, pueda analizar posteriormente su implicación en medidas de aislamiento acústico. Posteriormente, se realiza un análisis de la incertidumbre de medida para diferentes escenarios de medida, que culmina en dos ejemplos prácticos.

En relación a este mismo análisis, también se cuantifica la pérdida de información que se produce en el cálculo del valor de aislamiento acústico global que caracteriza un paramento. En concreto, se plantean tres problemas derivados del uso de la norma internacional que permite obtener dicho valor.

Por último, este escrito se complementa con una breve descripción teórica sobre aislamiento acústico y un modesto estudio de los métodos de medida normalmente empleados en ensayos "in situ". Dicha descripción teórica pretende ser una introducción para el lector que desconoce la materia, y el estudio de los métodos de medida, un análisis objetivo que justifica las directrices a cumplir establecidas por la normativa internacional (las cuales permiten establecer un primer contacto en relación al cálculo de incertidumbre de medida).

Palabras Clave: Pérdida de información, desviaciones desfavorables, índice de valoración del aislamiento, método de comparación, Ley de Propagación de Incertidumbres, Montecarlo.

Abstract

This paper seeks to analyze the measurement uncertainty associated with conducting a trial of airborne sound insulation between rooms. To do this, we calculate the measurement uncertainty introduced by each of the various measurable quantities that define the different assessment rates airborne sound insulation between rooms.

Previously, we define the concept known as measurement uncertainty in general and we illustrate a simple example for the reader that not knows the term can analyze its involvement in measures of acoustic insulation. Subsequently, we do an analysis of measurement uncertainty for different measurement scenarios, finishing in two examples.

Related with this same analysis, we also quantify the information loss that occurs in calculating the overall sound insulation value that characterizes a facing. In particular, three problems arise from the use of the international standard for obtaining this value.

Finally, this paper is complemented by a brief theoretical description of acoustic insulation and a modest study of the measurement methods normally used in “in situ” tests. This theoretical description is an introduction to readers unfamiliar with the area, and the study of methods of measurement, an objective analysis that warrants meet the guidelines established by international standards (which permits to establish a first contact in relation to the calculation measurement uncertainty).

Keywords: Information loss, adverse deviation, insulation assessment index, comparison method, Law of propagation of uncertainty, Montecarlo.

Índice General

Agradecimientos	....	i
Resumen	....	iii
Abstract	....	v
Índice de figuras	....	ix
Índice de tablas	....	xi
Objetivos	...	xiii
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN Y TEORÍA DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO		
1.1. EL RUIDO Y SU IMPORTANCIA EN LA ACTUALIDAD	.....	1
1.2. FUENTES GENERADORAS DE RUIDO	.....	2
1.3. VÍAS DE TRANSMISIÓN DEL RUIDO	.....	2
1.4. EMPLEO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO COMO SOLUCIÓN AL RUIDO	.....	4
1.5. DEFINICIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO	.....	5
1.6. AISLAMIENTO DE UNA PARTICIÓN O PARED SIMPLE	.....	5
1.7. AISLAMIENTO DE PAREDES DOBLES O DE MÚLTIPLES CAPAS	.....	7
1.8. AISLAMIENTO DE VENTANAS	....	10
1.9. AISLAMIENTO DE PUERTAS	....	10
1.10. AISLAMIENTO MIXTO	....	10
Capítulo 2: MEDIDA DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO ENTRE LOCALES		
2.1. INTRODUCCIÓN	....	13
2.2. MEDIDA CLÁSICA DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO ENTRE LOCALES	....	13
2.3. MEDIDAS ALTERNATIVAS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO ENTRE LOCALES: USO DE INTENSIMETRÍA ACÚSTICA Y SECUENCIAS MLS	....	26
Capítulo 3: ANÁLISIS DE LA NORMA UNE – EN ISO 717 – 1: 1997		
3.1. MOTIVACIÓN	....	37
3.2. ANÁLISIS EN RELACIÓN A LA OBTENCIÓN DEL MISMO VALOR DE AISLAMIENTO GLOBAL PARA DISTINTOS ESPECTROS	....	37
3.3. ANÁLISIS DE LAS PARTICULARIDADES QUE SE PRESENTAN AL EFECTUAR EL MÉTODO DE COMPARACIÓN AFECTANDO AL VALOR DE AISLAMIENTO	....	38
3.4. ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE INFORMACIÓN IRREVERSIBLE ASOCIADA A LA CURVA EMPLEADA EN EL MÉTODO DE COMPARACIÓN	....	39
Capítulo 4: INCERTIDUMBRE DE MEDIDA		
4.1. INTRODUCCIÓN	....	49
4.2. PROCEDIMIENTO BÁSICO PARA DETERMINAR LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA	....	49
4.3. EJEMPLO: DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE UNA SALA	....	54
4.4. MOTIVACIÓN DEL CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE EN MEDIDAS DE AISLAMIENTO	....	58
4.5. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE EN AISLAMIENTO ACÚSTICO	....	60
4.6. EJEMPLOS DE CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE EN MEDIDAS DE AISLAMIENTO	....	73

Capítulo 5: CONCLUSIONES	.... 89
Capítulo 6: PRESUPUESTO	.... 91
Glosario	.... 95
Referencias	.... 97
Anexo 1: ESPECTROS USADOS PARA EL ANÁLISIS DE LA NORMA UNE – EN ISO 717 – 1 :1997	
A1.1. MOTIVACIÓN	... 101
A1.2. PRIMER ESPECTRO	... 101
A1.3. SEGUNDO ESPECTRO	... 102
A1.4. TERCER ESPECTRO	... 102
A1.5. CUARTO ESPECTRO	... 103
A1.6. QUINTO ESPECTRO	... 103
A1.7. SEXTO ESPECTRO	... 104
A1.8. SÉPTIMO ESPECTRO	... 104
Anexo 2: CÁLCULO DE COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD	
A2.1. MOTIVACIÓN	... 105
A2.2. COEFICIENTES PARA EL CASO GENERAL (SIN RUIDO DE FONDO)	... 105
A2.3. COEFICIENTES PARA EL CASO PARTICULAR (CON RUIDO DE FONDO)	... 106
A2.4. COEFICIENTES PARA EL ANÁLISIS EXHAUSTIVO DEL RUIDO DE FONDO	... 118
Anexo 3: COMPONENTES QUE DERIVAN DEL INSTRUMENTO DE MEDIDA	
A3.1. MOTIVACIÓN	... 111
A3.2. CLASIFICACIÓN DE COMPONENTES	... 111
A3.3. INCERTIDUMBRE DEFINIDA POR COMPONENTES ASOCIADAS AL SONÓMETRO	... 111
A3.4. APORTACIÓN DE CADA COMPONENTE A LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA	... 112
A3.5. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEBIDA A LA INSTRUMENTACIÓN	... 114
Anexo 4: EJEMPLOS DE MEDIDA DE AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO	
A4.1. MOTIVACIÓN	... 115
A4.2. PRIMER EJEMPLO	... 115
A4.3. SEGUNDO EJEMPLO	... 119

Índice de figuras

• <i>Figura 1.1</i> – Diagrama esquemático de la transmisión del ruido	..... 3
• <i>Figura 1.2</i> – Diagrama de penetración del ruido en el interior de un recinto	..... 3
• <i>Figura 1.3</i> – Alternativas para medir el aislamiento acústico en función de la vía de transmisión sonora	..... 4
• <i>Figura 1.4</i> – Aislamiento acústico específico de un elemento constructivo	..... 5
• <i>Figura 1.5</i> – Aislamiento de una pared simple en función de la frecuencia	..... 6
• <i>Figura 1.6</i> – Aislamiento según la ley de la masa	..... 7
• <i>Figura 1.7</i> – Sistema mecánico que representa el comportamiento de una pared doble	..... 8
• <i>Figura 1.8</i> – Circuito eléctrico equivalente del sistema mecánico anterior	..... 8
• <i>Figura 1.9</i> – Aislamiento de una pared doble en función de la frecuencia	..... 8
• <i>Figura 1.10</i> – Elemento mixto	.... 11
• <i>Figura 2.1</i> – Disposición del ensayo del método clásico	.... 15
• <i>Figura 2.2</i> – Distribución de la presión acústica de ondas estacionarias	.... 16
• <i>Figura 2.3</i> – Ondas axiales, tangenciales y oblicuas	.... 16
• <i>Figura 2.4</i> – Campos producidos por una fuente única y distancia crítica	.... 20
• <i>Figura 2.5</i> – Curva de referencia en bandas de tercio de octava	.... 24
• <i>Figura 2.6</i> – Flujograma de la implementación del método de comparación de la norma UNE – EN ISO 717 – 1: 1997 para tercios de octava	.... 25
• <i>Figura 2.7</i> – Sonda de intensidad “tipo p – p”	.... 27
• <i>Figura 2.8</i> – Esquema de bloques del analizador de una sonda “tipo p – p”	.... 28
• <i>Figura 2.9</i> – Disposición del ensayo empleando intensimetría acústica	.... 29
• <i>Figura 2.10</i> – Evaluación del margen frecuencial por diferentes espaciadores	.... 43
• <i>Figura 2.11</i> – Técnica de barrido mediante una sonda de intensidad	.... 30
• <i>Figura 2.12</i> – Paramento bajo ensayo subdividido en pequeñas superficies	.... 31
• <i>Figura 2.13</i> – Secuencia MLS de orden 3	.... 32
• <i>Figura 2.14</i> – Medida de la respuesta impulsiva de un sistema acústico por el método MLS	.... 33
• <i>Figura 2.15</i> – Disposición del ensayo empleando secuencias MLS	.... 34
• <i>Figura 3.1</i> – Distribución normal	.... 40
• <i>Figura 3.2</i> – Distribuciones normales entorno a cada valor de aislamiento para cada frecuencia central	.... 40
• <i>Figura 3.3</i> – Dependencia entre el desplazamiento del Espectro 3 y la varianza	.... 42
• <i>Figura 3.4</i> – Situación que se presenta para los desplazamientos del Espectro 3	.... 43
• <i>Figura 3.5</i> – Comportamiento periódico entre el desplazamiento del Espectro 3 y la varianza para distintos valores objetivos	.... 43
• <i>Figura 3.6</i> – Dependencia entre el desplazamiento del Espectro 6 y la varianza	.... 44
• <i>Figura 3.7</i> – Dependencia entre el desplazamiento del Espectro 7 y la varianza	.... 45
• <i>Figura 4.1</i> – Sala bajo medición	.... 54
• <i>Figura 4.2</i> – Distribuciones normales entorno a cada valor de aislamiento para cada frecuencia central	.... 72
• <i>Figura 4.3</i> – Escenario de medida del primer ejemplo	.... 73
• <i>Figura 4.4</i> – Espectro resultante representativo de los valores de D_{nT} obtenidos	.... 74
• <i>Figura 4.5</i> – Situación de partida antes de efectuar Montecarlo	.... 77
• <i>Figura 4.6</i> – Histograma obtenido tras efectuar Montecarlo	.... 78
• <i>Figura 4.7</i> – Escenario de medida del segundo ejemplo	.... 79
• <i>Figura 4.8</i> – Espectro resultante representativo de los valores de D_{nT} obtenidos para ambas expresiones	.... 80
• <i>Figura 4.9</i> – Situación de partida antes de efectuar Montecarlo	.... 84
• <i>Figura 4.10</i> – Histograma obtenido tras efectuar Montecarlo	.... 85
• <i>Figura 6.1</i> – Diagrama de Gantt del cálculo de incertidumbre de medida	.... 92

• <i>Figura A1.1</i> – Resultados para el primer espectro tras efectuar el método de comparación	... 101
• <i>Figura A1.2</i> – Resultados para el segundo espectro tras efectuar el método de comparación	... 102
• <i>Figura A1.3</i> – Resultados para el tercer espectro tras efectuar el método de comparación	... 102
• <i>Figura A1.4</i> – Resultados para el cuarto espectro tras efectuar el método de comparación	... 103
• <i>Figura A1.5</i> – Resultados para el quinto espectro tras efectuar el método de comparación	... 103
• <i>Figura A1.6</i> – Situación de partida para el sexto espectro antes de efectuar el método	... 104
• <i>Figura A1.7</i> – Situación de partida para el séptimo espectro antes de efectuar el método	... 104
• <i>Figura A4.1</i> – Primer ejemplo: Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto emisor	... 116
• <i>Figura A4.2</i> – Primer ejemplo: Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor	... 117
• <i>Figura A4.3</i> – Primer ejemplo: Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora de ruido de fondo registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor	... 118
• <i>Figura A4.4</i> – Primer ejemplo: Espectros obtenidos a partir de los tiempos de reverberación medidos en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor	... 119
• <i>Figura A4.5</i> – Segundo ejemplo: Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto emisor	... 120
• <i>Figura A4.6</i> – Segundo ejemplo: Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor	... 121
• <i>Figura A4.7</i> – Segundo ejemplo: Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora de ruido de fondo registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor	... 122
• <i>Figura A4.8</i> – Segundo ejemplo: Espectros obtenidos a partir de los tiempos de reverberación medidos en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor	... 123

Índice de tablas

• <i>Tabla 2.1</i> – Valores para la curva de referencia en bandas de tercio de octava	.... 24
• <i>Tabla 2.2</i> – Frecuencias de muestreo y períodos de secuencias MLS	.... 35
• <i>Tabla 3.1</i> – Resultados del procedimiento general para desplazamientos del Espectro 3	.... 42
• <i>Tabla 3.2</i> – Resultados del procedimiento general para desplazamientos del Espectro 6	.... 44
• <i>Tabla 3.3</i> – Resultados del procedimiento general para varios desplazamientos del Espectro 7	.... 45
• <i>Tabla 4.1</i> – Medidas experimentales, medias y desviaciones típicas	.... 55
• <i>Tabla 4.2</i> – Valores de D_{nT} obtenidos del Espectro 1	.... 74
• <i>Tabla 4.3</i> – Valores referidos al recinto emisor para cada una de las frecuencias medidas	.... 75
• <i>Tabla 4.4</i> – Valores referidos al recinto receptor para cada una de las frecuencias medidas	.... 75
• <i>Tabla 4.5</i> – Valores referidos al recinto receptor para cada una de las frecuencias medidas	.... 76
• <i>Tabla 4.6</i> – Valores referidos al recinto receptor y emisor para cada una de las frecuencias medidas	.... 76
• <i>Tabla 4.7</i> – Valores de incertidumbre típica combinada y expandida para cada una de las frecuencias medidas	.... 77
• <i>Tabla 4.8</i> – Análisis del ruido de fondo que afecta a la medida de L_2	.... 79
• <i>Tabla 4.9</i> – Valores de D_{nT} obtenidos del Espectro 2	.... 80
• <i>Tabla 4.10</i> – Valores referidos al recinto emisor para cada una de las frecuencias medidas	.... 81
• <i>Tabla 4.11</i> – Valores referidos al recinto receptor para cada una de las frecuencias medidas	.... 81
• <i>Tabla 4.12</i> – Valores referidos al recinto receptor para cada una de las frecuencias medidas	.... 82
• <i>Tabla 4.13</i> – Valores referidos al recinto receptor para cada una de las frecuencias medidas	.... 82
• <i>Tabla 4.14</i> – Valores referidos al recinto receptor y emisor para cada una de las frecuencias medidas	.... 83
• <i>Tabla 4.15</i> – Valores de incertidumbre típica combinada y expandida para cada una de las frecuencias medidas	.... 83
• <i>Tabla 6.1</i> – Fases, tareas y duración de un cálculo de incertidumbre de medida de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales	.... 91
• <i>Tabla 6.2</i> – Retribución salarial para diferentes perfiles profesionales	.... 93
• <i>Tabla A1.1</i> – Valores de D_{nT} obtenidos del Espectro 1	... 101
• <i>Tabla A1.2</i> – Valores de D_{nT} obtenidos del Espectro 2	... 102
• <i>Tabla A1.3</i> – Valores de D_{nT} obtenidos del Espectro 3	... 102
• <i>Tabla A1.4</i> – Valores de D_{nT} obtenidos del Espectro 4	... 103
• <i>Tabla A1.5</i> – Valores de D_{nT} obtenidos del Espectro 5	... 103
• <i>Tabla A1.6</i> – Valores de D_{nT} obtenidos del Espectro 6	... 104
• <i>Tabla A1.7</i> – Valores de D_{nT} obtenidos del Espectro 7	... 104
• <i>Tabla A4.1</i> – Niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto emisor	... 115
• <i>Tabla A4.2</i> – Niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor	... 116
• <i>Tabla A4.3</i> – Niveles de presión sonora de ruido de fondo registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor	... 117
• <i>Tabla A4.4</i> – Tiempos de reverberación medidos en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor	... 118

- *Tabla A4.5* – Niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto emisor . . . 119
- *Tabla A4.6* – Niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor . . . 120
- *Tabla A4.7* – Niveles de presión sonora de ruido de fondo registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor . . . 121
- *Tabla A4.8* – Tiempos de reverberación medidos en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor . . . 122

Objetivos

El aislamiento acústico de recintos es un tema extenso y común a muchas competencias, motivo por el cual es abarcado y desarrollado por cientos de profesionales de diferentes sectores (arquitectos, ingenieros, físicos...). A día de hoy, no es posible concebir la construcción de un edificio, o el diseño de un recinto o instalación, sin considerar el aislamiento acústico de los paramentos que lo forman. Prueba de ello es la implantación en España de la última ley desarrollada en relación con el aislamiento (DB HR – Protección frente al ruido: 23 Abril de 2009). En esta nueva ley, se triplican las exigencias de aislamiento acústico en los hogares con respecto a la ley anterior que regulaba las condiciones acústicas en los edificios (NBE – CA – 88: 1988) y se introducen dos cambios fundamentales:

- Las exigencias de insonorización frente al ruido exterior dependerán de la zona en la que se ubique la edificación para garantizar los mismos niveles de confort a todos los ciudadanos.
- Se posibilita el poder efectuar la medida “in situ” (en la propia vivienda) indistintamente de los resultados que se obtengan en el laboratorio, a diferencia de lo que se venía haciendo hasta ahora, donde la única forma válida de medir el aislamiento era en un laboratorio, para posteriormente estimar el aislamiento de los paramentos de la vivienda.

En relación a esta segunda circunstancia y con la intención de ahondar en la materia, se ha planteado como el principal objetivo de este proyecto, calcular la incertidumbre de medida que se produce en un ensayo, puesto que tradicionalmente, la incertidumbre en las medidas de aislamiento acústico es un tema que no ha sido suficientemente estudiado.

Para ello, previamente es necesario: fraguar conceptos, fenómenos físicos y formulaciones que definen el aislamiento acústico a ruido aéreo; estudiar y extender los diferentes métodos de medida de la transmisión sonora sobre un paramento; y definir las características técnicas del equipamiento necesario para efectuar mediciones “in situ”, explicando la razón de ser de su ubicación en los locales bajo estudio.

Además, en este proyecto también se analizan los diferentes índices de valoración del aislamiento que marca la normativa internacional, evaluando la pérdida de información que surge a la hora de expresar el aislamiento global de un paramento, fenómeno que se encuentra relacionado con la incertidumbre de medida.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y TEORÍA DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO

1.1. EL RUIDO Y SU IMPORTANCIA EN LA ACTUALIDAD

Es difícil definir el ruido con precisión. Se han dado definiciones que giran alrededor de los conceptos de sonido *desagradable*, sonido *no deseado*, sonido *perjudicial*, *molesto*, *perturbador* o *dañino* para quien lo percibe. El ruido actúa a través del oído sobre el sistema nervioso del ser humano. Cuando el estímulo sobrepasa determinados límites, se produce sordera y efectos patológicos, tanto instantáneos como diferidos. A niveles mucho menores, el ruido produce malestar y dificulta o impide la atención, la comunicación, la concentración, el descanso y el sueño. La reiteración de estas situaciones puede ocasionar estados crónicos de nerviosismo y estrés, lo que a su vez, lleva a trastornos psicofísicos, enfermedades cardiovasculares y alteraciones del sistema inmunitario.

El ruido es un problema de gran importancia económica en la sociedad moderna. La disminución del rendimiento escolar o profesional, los accidentes laborales o de tráfico, ciertas conductas antisociales, la tendencia al abandono de las urbes, la pérdida de valor de los inmuebles y un largo etcétera son algunas de las consecuencias. La combinación de todos los factores anteriormente descritos ha convertido en inhóspitas muchas ciudades, deteriorando en ellas fuertemente los niveles de comunicación y las pautas de convivencia.

Por razones económicas, la industria está haciendo un considerable esfuerzo para desarrollar productos silenciosos e intentar lograr condiciones controlables en oficinas y fábricas en lo que a ruido se refiere. Sin embargo, no siempre resulta posible establecer relaciones explícitas entre el ruido y sus efectos sobre los humanos. Algunos de estos efectos son de tal importancia, que desemboca en que las empresas y las industrias estén gastando anualmente cantidades considerables de dinero para lograr entornos con un cierto confort acústico.

Tal es la importancia que el ruido tiene en la actualidad, que en España entró en vigor el 19 de octubre de 2007 el Real Decreto 1367, por el que se desarrolla la Ley 37/2003 (Ley del Ruido), de 17 noviembre, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. Su objetivo es prevenir, vigilar y reducir la contaminación acústica, para evitar y disminuir los daños que de ésta pueden derivarse para la salud humana, los bienes o el medio ambiente.

Hasta esta ley, el ruido carecía de una norma general reguladora de ámbito estatal, y su tratamiento normativo se desdoblaba entre las previsiones de la normativa civil en cuanto a relaciones de vecindad y causa de perjuicios, la normativa sobre limitación del ruido en el ambiente de trabajo, las disposiciones técnicas para la homologación de productos y las ordenanzas municipales que conciernen al bienestar ciudadano o al planeamiento urbanístico.

Tales eran las implicaciones que la Ley del Ruido podía tener en la edificación, como consecuencia de que los edificios fueran considerados por la citada Ley como parte del Medio Ambiente y, en concreto, como receptores acústicos, que era necesario modificar la normativa acústica vigente (NBE – CA – 88), la cual trataba las condiciones acústicas en los edificios desde el 29 de Septiembre de 1998.

Este hecho, junto con la entrada en vigor del nuevo Código Técnico de la Edificación (CTE) el 29 de Marzo de 2006, hizo que la Ley del Ruido demandara a éste un sistema de verificación acústica de las edificaciones. En consecuencia, el 24 de Abril de 2009 entró en vigor la nueva normativa contra el ruido expuesta en el “*DB – HR Protección frente al ruido*”, documento del cual se espera que establecerá las exigencias de aislamiento acústico frente al ruido exterior e interior de los edificios. Concretamente este Documento Básico especifica parámetros objetivos y sistemas de verificación cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de protección frente al ruido. El objetivo de dicho requisito, consiste en limitar, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

Para satisfacer este objetivo, los edificios se proyectarán, construirán y mantendrán de tal forma que los elementos constructivos que conforman sus recintos tengan unas características acústicas adecuadas para reducir la transmisión del ruido aéreo, del ruido de impactos, del ruido y vibraciones de las instalaciones propias del edificio; y para limitar el nivel reverberante presente en los recintos.

Por lo tanto, podemos basarnos en la idea principal de que el ruido se produce en unos *focos sonoros o fuentes* (calle, televisor, discoteca, carretera...), se transmite a través de un *medio* (cuerpos sólidos, líquidos, aire...), y por último, llega al *receptor* (un individuo, una comunidad...).

1.2. FUENTES GENERADORAS DE RUIDO

El grado de contaminación ambiental en los grandes centros de población debido al ruido, tiene cada día más trascendencia, por lo que se trata de estudiar y conocer con profundidad las fuentes sonoras y sus características físicas, para disminuir los niveles de ruido que generan y proteger a las personas de este fenómeno.

Con el conocimiento de estas fuentes de ruido podremos conseguir que los recintos tengan el ambiente acústico adecuado, permitiendo que las actividades que se lleven a cabo en los mismos, se desarrollen con normalidad y mayor confort. Las *fuentes de ruido* más importantes se pueden dividir en dos grandes grupos:

1.2.1. Externas a la edificación

Como por ejemplo: el ruido debido al tráfico rodado, al paso de trenes, al tráfico aéreo, al tráfico marítimo, a las obras públicas, a las actividades industriales, a las actividades urbanas comunitarias y a los agentes atmosféricos.

1.2.2. Internas a la edificación

Como por ejemplo: el ruido debido a las personas, a los impactos, a los aparatos de radio y televisión, a los aparatos electrodomésticos, a las instalaciones de fontanería y calefacción, a los ascensores, a las instalaciones de ventilación y climatización, a las instalaciones eléctricas y a otras fuentes (como animales).

1.3. VÍAS DE TRANSMISIÓN DEL RUIDO

El ruido puede alcanzar a un oyente o receptor por diferentes caminos. En la Figura 1.1, el bloque denominado *fuentes* puede representar más de una fuente acústica; el *medio* o los *caminos* pueden ser numerosos y el *receptor* puede representar una única persona, un grupo, una comunidad completa, o un equipo cuyo funcionamiento se vea afectado por el ruido.

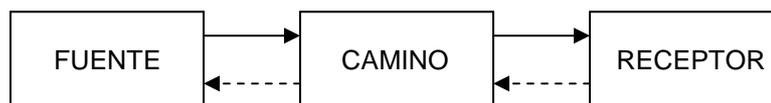


Figura 1.1 – Diagrama esquemático de la transmisión del ruido.

Las flechas continuas representan la transmisión del sonido desde una fuente a un oyente y las discontinuas indican la interacción entre los distintos elementos del diagrama de bloques.

Aunque la fuente, el camino y el receptor se muestran como elementos separados en el diagrama de bloques de la figura, hay una interacción considerable entre ellos, así como la que puede haber entre los muchos componentes que constituyen *fuente*, *camino* y *receptor*, no siendo elementos independientes. La reacción del *receptor* depende de las características del *camino* y de la *fuente*.

Existen varios caminos posibles por donde el ruido puede penetrar en los recintos, tal y como podemos ver en la Figura 1.2. Las principales vías de penetración pueden ser las que se exponen a continuación, clasificadas en dos grandes grupos:

1.3.1. Ruidos que penetran en el recinto por la vía de transferencia aérea

- A través de las aberturas y grietas en las paredes $\Rightarrow e_a$.
- A través de los conductos de ventilación $\Rightarrow e_t$.
- A través de los poros en paredes duras y continuas $\Rightarrow e_p$.
- Por vibraciones elásticas de la pared (vibraciones de flexión) que separa el recinto que se desea aislar del que contiene las fuentes $\Rightarrow e_{ve}$.

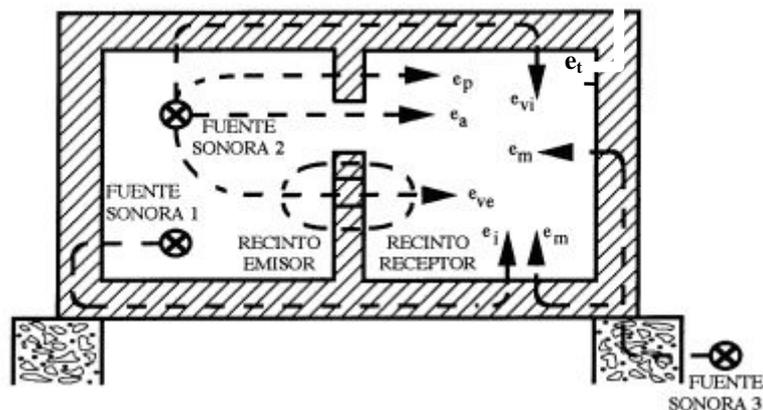


Figura 1.2 – Diagrama de penetración del ruido en el interior de un recinto.

1.3.2. Ruidos que alcanzan el recinto después de generarse y propagarse a través de cuerpos sólidos

- Como resultado de las vibraciones del material de las paredes, convirtiéndose ellas mismas en radiadores de sonido (transmisión de ruido de impacto) $\Rightarrow e_i$.
- Por vibraciones longitudinales elásticas de paredes no adyacentes (transmisión por flancos), que se propagan por el espesor de las paredes y son radiadas al recinto por las paredes laterales $\Rightarrow e_{vi}$.
- Por vibraciones de maquinaria transmitidas a través del suelo, cimientos y otras partes de la estructura del edificio $\Rightarrow e_m$.

1.4. EMPLEO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO COMO SOLUCIÓN AL RUIDO

El aislamiento acústico consiste en la protección de un recinto contra la penetración de sonidos que interfieran a la señal sonora deseada, que se esté propagando en su interior. De esta forma, puede considerarse un método pasivo de control de ruido. Como hemos visto, las fuentes que originan estos sonidos pueden estar en el interior o en el exterior del edificio y para encontrar las formas de protección de los recintos contra el ruido, se debe establecer la naturaleza de estos ruidos y los caminos por los cuales penetran en el recinto, a través de sus superficies límites.

Debemos conocer en qué medida el aislamiento acústico depende de las propiedades físicas del material de los paramentos y de las características del ruido. Tiene una gran importancia conocer la dependencia del aislamiento acústico con la frecuencia, ya que tanto la transmisión acústica de los diversos materiales como la percepción auditiva, dependen de la misma.

Como mencionamos en el punto 1.3, el ruido puede transmitirse por *vía aérea* (al incidir la onda sonora sobre una superficie, la hace vibrar, y ésta, hace vibrar el aire en el recinto contiguo, además de poder atravesar la superficie a través de los poros) o por *vía estructural* (se hace vibrar la superficie mediante la acción de una fuerza externa, transmitiéndose la vibración a lo largo de la superficie, haciendo finalmente vibrar el aire entorno a la misma).

Existen diferentes alternativas para medir el aislamiento acústico de un recinto “in situ” y de los elementos que lo componen, tal y como se ilustra esquemáticamente en la Figura 1.3.

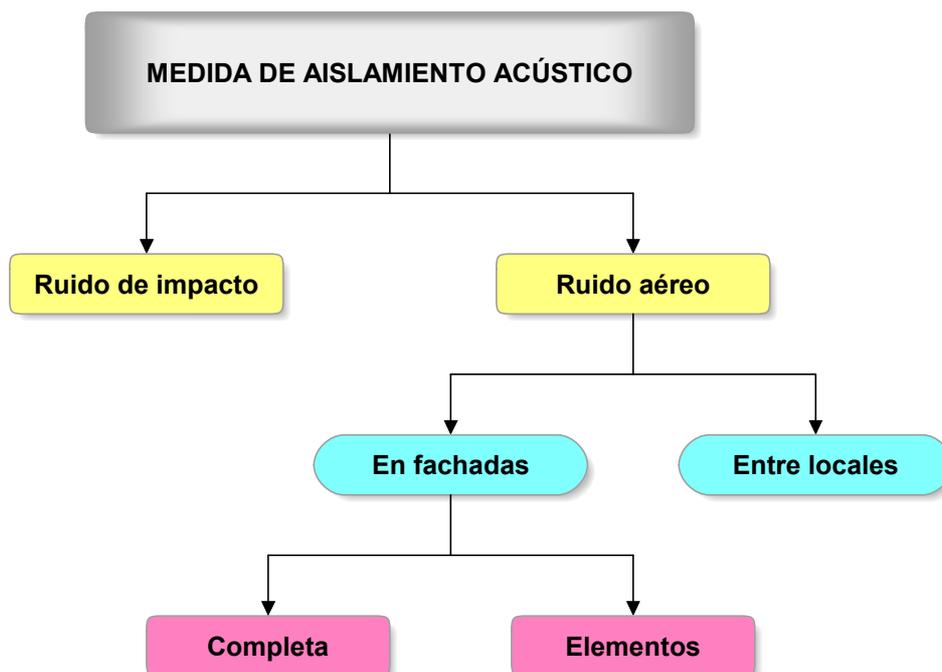


Figura 1.3 – Alternativas para medir el aislamiento acústico en función de la vía de transmisión sonora.

La familia de normas internacionales que contempla dichas alternativas se corresponde con la ISO 140 “Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción”. Esta norma está compuesta por 14 partes. Las partes 1, 3, 6, 8, 9, 10, 11 y 12 están centradas en las medidas en cámaras y laboratorios, que permiten medir en laboratorio el aislamiento de los elementos constructivos, para luego predecir el aislamiento que ofrecerán una vez montados. Por el contrario, las partes 4, 5, 7 y 14 centran su atención en las medidas “in situ”.

Para la realización de este proyecto, centraremos nuestro estudio en medidas “in situ”, dejando de lado las medidas realizadas en laboratorio. Concretamente lo orientaremos al estudio de la vía aérea entre locales. Así, centraremos nuestro interés en la norma UNE – EN ISO 140 – 4: 1999. “Medición in situ del aislamiento a ruido aéreo entre locales” y en la parte de la norma UNE EN ISO 140 – 14: 2005. “Directrices para situaciones especiales in situ” dedicada a aislamiento a ruido aéreo.

1.5. DEFINICIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO

El objetivo para obtener un correcto aislamiento acústico a ruido aéreo, consiste en evitar que el medio transmisor del ruido (el aire) circule libremente. Concretamente, se debe evitar el camino de transmisión directa entre emisor y receptor, mediante la colocación de barreras, pantallas, paredes, paramentos, etc.

Definimos el *aislamiento acústico bruto a ruido aéreo (D)* de un recinto respecto a otro, como la diferencia entre el nivel de presión sonora medido en el local emisor [dB] y el nivel de presión sonora medido en el local receptor [dB], el cual viene dado por la expresión 1.1.

$$D \text{ [dB]} = L_p \text{ emisor} - L_p \text{ receptor} \quad (1.1)$$

Como se puede apreciar en el ejemplo de la Figura 1.4, el nivel de presión acústica incidente es de 80 dB en los dos casos, mientras que el nivel de presión acústica en el local receptor es de 35 dB en un caso y de 20 dB en el otro, de modo que el aislamiento acústico a ruido aéreo es de 45 dB en el primer paramento y de 60 dB en el segundo.

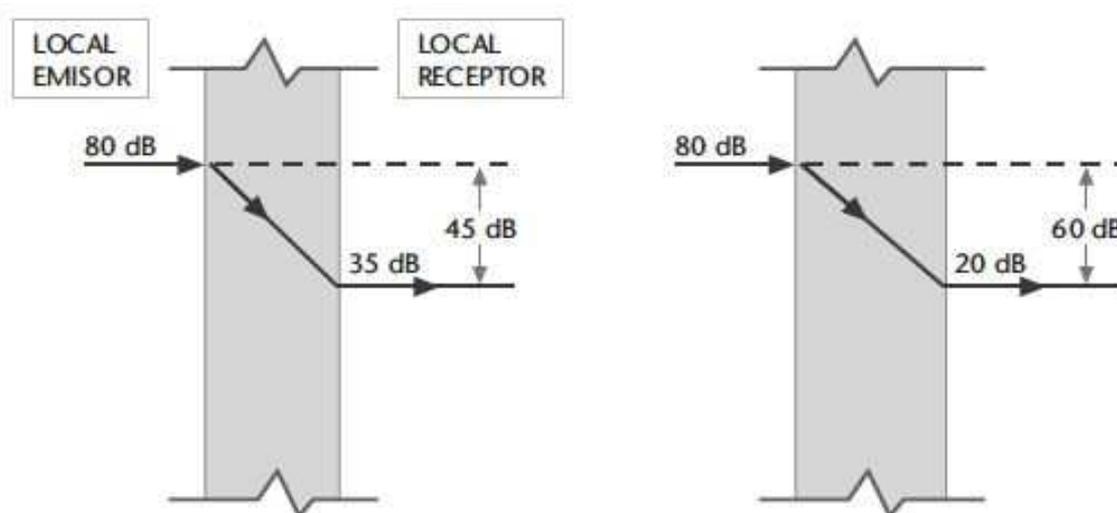


Figura 1.4 – Aislamiento acústico específico de un elemento constructivo.

1.6. AISLAMIENTO DE UNA PARTICIÓN O PARED SIMPLE

Se entiende por pared sencilla o de una sola capa, a una pared en la que los puntos de la masa que están sobre la misma normal no modifican su distancia mutua cuando la pared realiza vibraciones. La pared de una sola capa no tiene porque ser homogénea, puede estar formada por varias capas y puede contener también espacios vacíos o huecos.

A la vista de la Figura 1.5, se puede observar que el aislamiento acústico de una pared simple se encuentra gobernado por 3 zonas: *zona 1* (por la rigidez y las resonancias), *zona 2* (por la ley de la masa) y *zona 3* (por la coincidencia de las ondas).

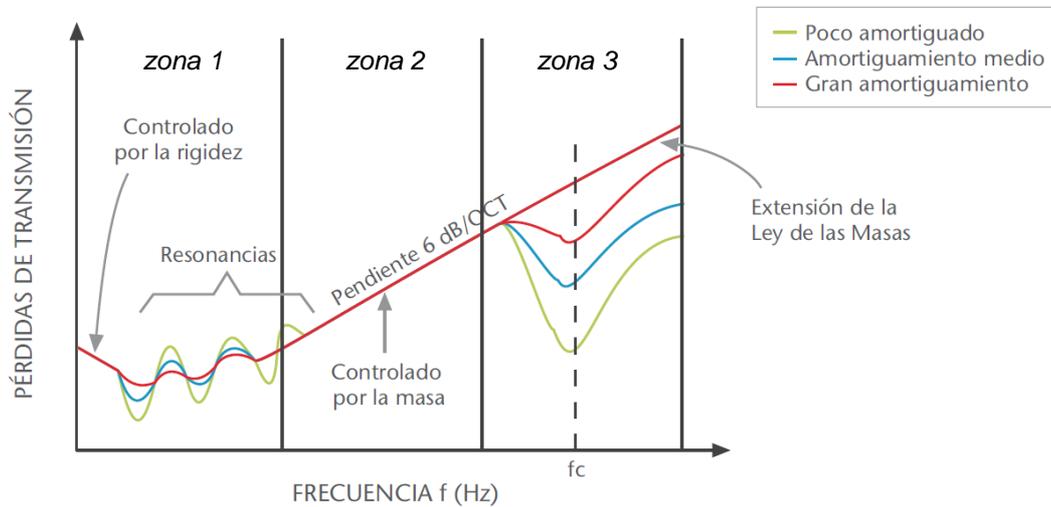


Figura 1.5 – Aislamiento de una pared simple en función de la frecuencia.

A continuación, se definen las zonas que gobiernan el aislamiento de una pared simple:

- **Zona 1 (aislamiento gobernado por la rigidez)**

La rigidez es la propiedad que posee un material o elemento estructural para soportar deformaciones. Estableciendo un símil entre la rigidez de una placa y el caso de una pared simple, la rigidez (G) puede definirse mediante la ecuación 1.2.

$$G \text{ [N/m]} = \frac{E \cdot d}{12 \cdot (1 - \sigma^2)} \quad (1.2)$$

donde,

- d [m] es el espesor del paramento.
- σ es el coeficiente de Poisson del material.
- E [N/m²] es el módulo de Young del mismo, siendo éste y el anterior característicos de la elasticidad del material.

En esta zona, este factor puede influir en cuanto a la capacidad de absorción sonora del paramento a determinadas frecuencias. Cuanto mayor sea la deformación de los materiales que lo forman al ser penetrados por la onda sonora, menor será el aislamiento que presente.

- **Zona 2 (aislamiento gobernado por la ley de la masa)**

En esta zona, la pérdida por transmisión del sonido de un panel depende de su masa por unidad de área, por lo que el aislamiento de una pared sencilla, puede estimarse a partir de la *ley de la masa*, la cual viene dada por la igualdad 1.3.

$$R \text{ [dB]} = 20 \cdot \log \left(\frac{M \cdot \omega}{2 \cdot Z} \right) \quad (1.3)$$

donde,

- R [dB] es el aislamiento.
- ω [rad] es la frecuencia angular, siendo $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ y f [Hz] la frecuencia.
- M [kg/m²] es la masa por unidad de superficie.
- Z [rays] es la impedancia acústica del aire, siendo $Z = 415$ a una temperatura de 20 °C y una humedad del 70 %.

La ley de masa predice que la pérdida por transmisión aumentará en 6 dB por cada duplicación de la masa de la superficie o de la frecuencia (Figura 1.6).

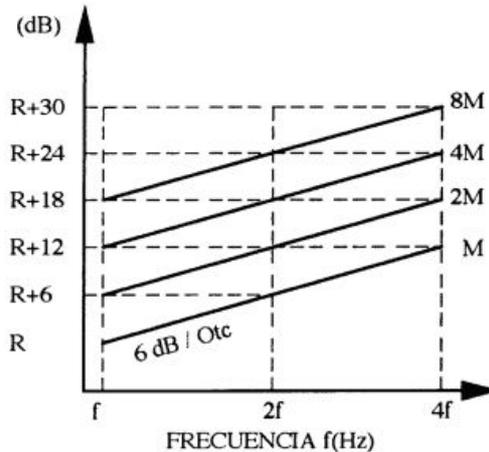


Figura 1.6 – Aislamiento según la ley de masa.

- **Zona 3 (aislamiento gobernado por la coincidencia de las ondas)**

En esta zona, debido a la naturaleza elástica de los elementos, aparece un rango de frecuencias en que la pérdida por transmisión de una partición está controlada por la rigidez y las resonancias presentes en la zona 1. En este rango se encuentra la *frecuencia crítica* o *frecuencia de coincidencia* (f_c), donde la longitud de onda de las ondas libremente flexionadas en la pared, coincide con la longitud de onda del sonido incidente.

Esta frecuencia depende de la rigidez y el grosor del material, de modo que, cuanto más rígida o gruesa sea la capa del material, más baja será la frecuencia. Así pues, en la zona alrededor de esta frecuencia, la energía acústica incidente se transmite a través de los paramentos en forma de ondas de flexión (vibraciones de flexión), que al acoplarse con las ondas de presión del campo acústico, dan origen a una importante disminución del aislamiento, llamándose a este fenómeno *efecto de coincidencia*. Por lo explicado anteriormente, interesa desplazar esta frecuencia fuera de la zona en la que es necesario el aislamiento. Concretamente habrá que situarla por encima.

La frecuencia de coincidencia viene dada por la ecuación 1.4, donde ρ_o [kg/m^3] es la densidad del material del paramento.

$$f_c [\text{Hz}] = \frac{6,4 \cdot 10^4}{d} \cdot \sqrt{\frac{\rho_o \cdot (1 - \sigma^2)}{E}} \quad (1.4)$$

Por lo tanto, las paredes gruesas tendrán una frecuencia crítica a baja frecuencia y las paredes delgadas la tendrán en la región de alta frecuencia.

1.7. AISLAMIENTO DE PAREDES DOBLES O DE MÚLTIPLES CAPAS

Según la ley de la masa, para aumentar el aislamiento acústico de una pared simple en 6 dB, tenemos que duplicar su masa. Esta solución es eficaz pero resulta antieconómica cuando necesitamos aislamientos elevados, ya que sería necesario aumentar la masa considerablemente. De manera que, para incrementar el aislamiento acústico de la pared, se opta por dividirla en un número de capas más delgadas, de tal manera que el sonido se reduce por etapas. Todo lo que hay que tener en cuenta en la pared de varias capas, estará relacionado con evitar o disminuir la repercusión de las distintas capas entre sí.

Un aislamiento alto sólo se puede obtener cuando la segunda pared no ejerce acción alguna sobre la primera, es decir, cuando entre las paredes no existe ninguna clase de acoplamiento. En paredes múltiples existen tres tipos de acoplamiento:

1.7.1. Resonancia de las paredes

Una pared doble presenta a bajas frecuencias un sistema masa-muelle-masa, en donde las masas por unidad de superficie (M_1 [kg/m^2] y M_2 [kg/m^2]) son las dos capas de la pared y el muelle es la cámara de aire (d [m]) que las separa (es decir, la distancia entre las paredes).

Este tipo de sistema es capaz de vibrar y posee una *frecuencia de resonancia* (f_r), dada por la expresión 1.5.

$$f_r \text{ [Hz]} = k \cdot \sqrt{\frac{1}{d} \cdot \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)} \quad (1.5)$$

donde k es una constante igual a 60 (para una cavidad vacía) o igual a 43 (para una cavidad rellena de material absorbente del sonido).

Este tipo de acoplamiento puede representarse mediante el sistema mecánico de la Figura 1.7.

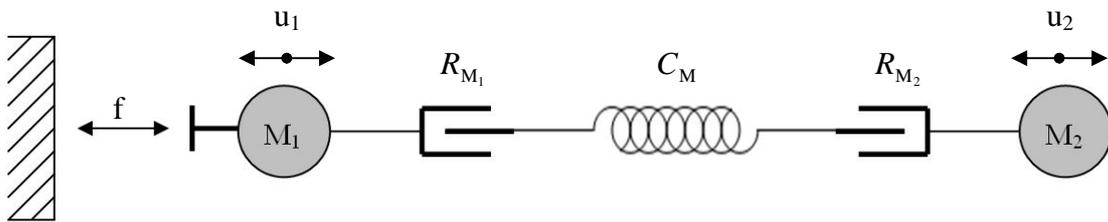


Figura 1.7 – Sistema mecánico que representa el comportamiento de una pared doble.

donde,

- f [N] representa la fuerza con la que la onda sonora penetra en la primera pared.
- u_1 [m/s] la velocidad de desplazamiento de las partículas del material de la primera pared.
- u_2 [m/s] la velocidad de desplazamiento de las partículas del material de la segunda pared.
- R_{M_1} [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$] la resistencia mecánica de la primera pared.
- R_{M_2} [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$] la resistencia mecánica de la segunda pared.
- C_M [m/N] la compliancia mecánica entre ambas paredes.

O también por medio de su circuito eléctrico equivalente en analogía movilidad, tal y como se ilustra en la Figura 1.8.

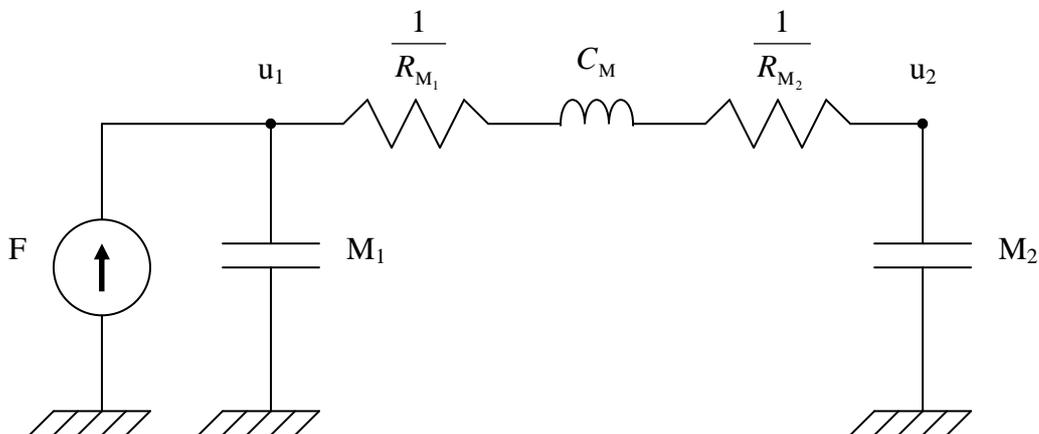


Figura 1.8 – Circuito eléctrico equivalente del sistema mecánico anterior.

1.7.2. Ondas estacionarias en la cavidad

Sucede cuando las ondas que se encuentran en la cámara de aire inciden perpendicularmente, apareciendo un acoplamiento entre las capas de la pared múltiple para las siguientes frecuencias:

$$f_n [\text{Hz}] = n \cdot \left(\frac{c}{2 \cdot d} \right) \quad (1.6)$$

donde para las cuales,

- c [m/s] es la velocidad del sonido, cuyo valor es igual a 343 a una temperatura de 20 °C.
- d [m] es la distancia entre paredes.
- n son los modos de vibración, siendo su valor $n = 1, 2, 3 \dots$

1.7.3. Uniones rígidas entre paredes

A estas uniones se las conoce como *puentes acústicos*, los cuales producen un acoplamiento directo, disminuyendo el aislamiento.

Por tanto, teniendo en cuenta estos tres tipos de acoplamiento, el aislamiento acústico de una pared doble (Figura 1.9) se comportará de la siguiente forma:

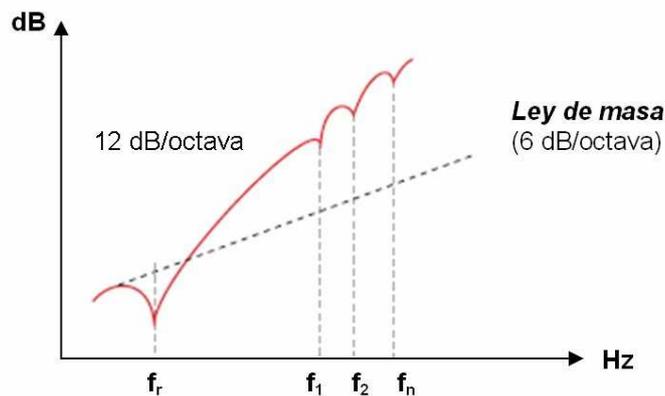


Figura 1.9 – Aislamiento de una pared doble en función de la frecuencia.

- ⇒ Para frecuencias inferiores a la frecuencia de resonancia, aún existiendo dos tabiques, se comporta como uno solo de masa M [kg/m^2] = $M_1 + M_2$, donde el aislamiento se define por la expresión 1.7.

$$R [\text{dB}] = 20 \cdot \log [f \cdot (M_1 + M_2)] - 47 \quad (1.7)$$

- ⇒ Para frecuencias superiores a la de resonancia, el aislamiento total será la suma de los aislamientos de las dos capas, menos un término que depende del espesor de la capa intermedia, tal y como indica la expresión 1.8, siendo α el coeficiente de absorción del material con el que se trata la cavidad de aire.

$$R [\text{dB}] = R_1 + R_2 - \left[10 \cdot \log \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{4} \right) \right] \quad (1.8)$$

⇒ Para frecuencias próximas a la de resonancia, el aislamiento total vendrá dado por la igualdad 1.9 y tendrá en cuenta no sólo el aislamiento de las dos capas como si fuesen una sola, sino también el amortiguamiento mecánico.

$$R \text{ [dB]} = R_1 + R_2 + 10 \cdot (\log d) + 10 \cdot (\log k) \cdot \alpha + 10 \cdot \log \left(\frac{h+b}{h \cdot b} \right) + 3 \quad (1.9)$$

donde,

- $k = 0,1$ para $d = 0,1$ [m].
- $k = 0,2$ para $d = 0,2$ [m].
- $k = 0,5$ para $0,3$ [m] $< d < 0,5$ [m].
- h [m] y b [m] son las dimensiones del paramento a aislar.

Si analizamos con detenimiento la Figura 1.9 podemos observar que para frecuencias superiores a la frecuencia de resonancia es donde realmente se aprecia la ventaja de la pared doble, ya que para una masa equivalente a la de una pared simple, la mejora del aislamiento teórico alcanza los 12 dB al duplicar la frecuencia, en vez de 6 dB que se consigue en una pared simple.

1.8. AISLAMIENTO DE VENTANAS

El factor básico que influye en el aislamiento de ventanas es el espesor de los cristales. Se pueden obtener buenos resultados empleando ventanas dobles construidas con vidrios de diferentes espesores. Además, como en el caso de paredes dobles, el espacio aéreo entre las hojas de la ventana influye en el aislamiento.

De manera que, para evitar la influencia de las ondas estacionarias perpendiculares a la superficie del cristal, es aconsejable colocar una hoja recta y otra ligeramente inclinada respecto a la anterior. Y con el fin de evitar un efecto de coincidencia importante en la curva de aislamiento, se deben utilizar capas de distinto espesor o de diferentes materiales. Una de las capas frecuentemente suele ser más pesada, mientras que la otra es de material más blando a la flexión. Por otro lado, el uso de relleno en los marcos de las ventanas aumenta el aislamiento sonoro en 6 ó 7 dB.

1.9. AISLAMIENTO DE PUERTAS

Junto con las ventanas, las puertas son los peores elementos de las paredes con respecto al aislamiento acústico. Esto es debido a que tienen un peso comparativamente bajo y no siempre cierran herméticamente.

Un problema importante de las puertas es el de las holguras y rendijas de las carpinterías, ya que pueden causar disminuciones en el aislamiento del orden de 3 a 5 dB.

El material con el que están fabricadas, el método de construcción o la presencia de grietas alrededor del marco de la puerta, tienen un efecto sobre el valor del aislamiento obtenido. Por lo que, el hecho de sellar las grietas y aberturas de la misma, podría aumentar el aislamiento acústico de 5 a 7 dB.

1.10. AISLAMIENTO MIXTO

En la edificación, es normal encontrarse con la presencia de elementos formados por conjuntos constructivos diferentes, que se caracterizan por aislamientos específicos muy distintos entre sí.

El aislamiento acústico global de un elemento mixto (por ejemplo, un paramento con puerta o ventana), dependerá tanto del área de cada uno de los elementos constructivos (paramento, puerta, ventana...), como del aislamiento específico de cada uno de los elementos constructivos.

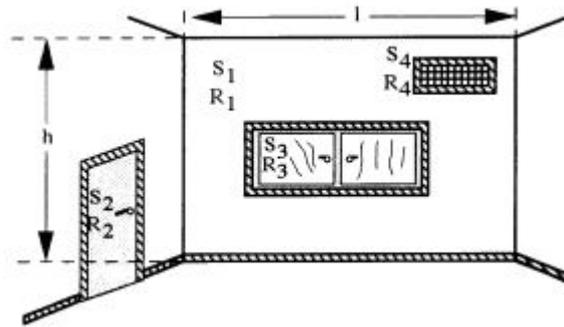


Figura 1.10 – Elemento mixto.

El aislamiento acústico global R_g [dB] de un elemento mixto (como por ejemplo el de la Figura 1.10), formado por una pared de área S_1 [m²] y de aislamiento acústico R_1 [dB], una ventana de área S_3 [m²] y de aislamiento acústico R_3 [dB], una puerta de área S_2 [m²] y de aislamiento acústico R_2 [dB] y una rejilla de área S_4 [m²] y de aislamiento acústico R_4 [dB], se puede obtener a partir de la expresión 1.10.

$$R_g \text{ [dB]} = 10 \cdot \log \left[\frac{\sum S_i}{\sum \left(\frac{S_i}{10^{0,1 \cdot R_i}} \right)} \right] \quad (1.10)$$

siendo,

- S_i [m²] es el área del elemento constructivo i .
- R_i [dB] el aislamiento específico del elemento constructivo de dicho área.

Si analizamos la expresión, se deduce que el elemento de aislamiento acústico más débil condiciona fundamentalmente el valor del aislamiento acústico global. Por ello conviene combinar elementos con aislamientos parecidos.

Por lo tanto, para mejorar el aislamiento acústico de cerramientos con puertas o ventanas, será preferible mejorar el aislamiento de los huecos frente al de las partes ciegas.

Los criterios prioritarios para diseñar un cerramiento mixto con un determinado aislamiento acústico son los siguientes:

- Determinar un elevado aislamiento para el hueco, que dependerá de dos factores: el espesor del acristalamiento u hoja (mediante la ley de masa) y la estanqueidad de la carpintería.
- Determinar una pequeña proporción de superficie del hueco respecto a la superficie ciega.
- Determinar un elevado aislamiento acústico para el cerramiento (aunque en la práctica este factor suele ser casi irrelevante).

Capítulo 2

MEDIDA DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO ENTRE LOCALES

2.1. INTRODUCCIÓN

A la hora de efectuar cualquier medida de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales, es necesario:

- ✓ Medir o calcular una serie de magnitudes.
- ✓ Efectuar un método de medida que permita evaluar dichas magnitudes con precisión.
- ✓ Disponer del equipo necesario para poder llevar a cabo el ensayo, respetando las consideraciones a tener en cuenta durante el mismo.
- ✓ Tras efectuar el ensayo, poder evaluar los resultados obtenidos con los índices de valoración del aislamiento a ruido aéreo a partir de las magnitudes medidas o calculadas.

Por lo tanto, el objetivo de este capítulo, consiste en tratar de explicar las condiciones y requisitos necesarios de la norma de referencia para efectuar medidas de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales. Una vez asimilados éstos, se establecerán como base para analizar otras formas de medida alternativas.

2.2. MEDIDA CLÁSICA DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO ENTRE LOCALES

2.2.1. Generalidades

- Magnitudes medibles o calculables
 - ✓ Nivel medio de presión sonora en ambos recintos (siendo L_1 [dB] el nivel en el recinto emisor y L_2 [dB] el nivel en el recinto receptor).
 - ✓ Tiempo de reverberación en el recinto receptor (T [s]).
 - ✓ Nivel medio de ruido de fondo en el recinto receptor (L_{RF} [dB]).
- Método de medida y condiciones que se deben dar para efectuarlo

El método de medida que permite evaluar dichas magnitudes, viene redactado en la norma UNE – EN ISO 140 – 4: 1999. A este método se le denomina “método clásico” y normalmente se emplea en medidas de aislamiento a ruido aéreo entre locales. Dicha norma especifica que para poder efectuar el método de medida correctamente, se deben dar las siguientes condiciones:

- ✓ Que ambos recintos cumplan las condiciones de campo difuso, las cuales son:
 - ⇒ Las ondas reflejadas llegan a todos los puntos en el interior del recinto desde diferentes direcciones, siendo todas estas direcciones igualmente probables.
 - ⇒ La energía sonora en un punto del espacio, se pueda obtener sumando aritméticamente los valores medios de las energías de todas las reflexiones que pasan a través de dicho punto.
 - ⇒ La densidad de energía sonora en un instante de tiempo es la misma en cualquier punto del recinto.

(Las condiciones de campo difuso se pueden comprobar “in situ” utilizando el procedimiento descrito en el apartado 3 de la norma UNE – EN ISO 140 – 14: 2005)

- ✓ El sonido generado en el recinto emisor sea estacionario y tenga un espectro continuo en el rango de frecuencias considerado.
- ✓ Asegurar que las observaciones en la sala receptora no estén afectadas por ruidos ajenos.
- ✓ El espectro sonoro en el recinto emisor no tenga diferencias de nivel mayores de 6 dB entre bandas de tercio de octava adyacentes.
- ✓ La potencia sonora sea lo suficientemente alta como para que el nivel de presión sonora en el recinto receptor sea, al menos, 10 dB más alto que el nivel de ruido de fondo en cualquier banda de frecuencia.
- ✓ Deberán utilizarse difusores en recintos vacíos de idéntico tamaño, para aumentar la difusión del campo sonoro.

- Equipo necesario para poder llevar a cabo el ensayo

1. *Micrófono de medida*

- ✓ Sirve para registrar los diferentes niveles de presión sonora (L_j [dB]) en ambos recintos.
- ✓ Puede ser fijo o móvil. La primera cuestión que los diferencia es que con un micrófono fijo hay que ir variando su posición a lo largo del recinto para realizar un muestreo uniforme del campo sonoro en tres dimensiones, mientras que con el micrófono móvil es más sencillo, puesto que la trayectoria que describe es inclinada. La segunda diferencia radica en que el micrófono móvil, al ser rotatorio, necesita un trípode especial bastante más caro con respecto al que necesita el micrófono fijo.

2. *Generador de ruido*

- ✓ Su función es la de generar ruido rosa o blanco, el cual es necesario para el ensayo.
- ✓ Puede generarse por medio de un equipo externo, de un software específico incluido en un sonómetro de medida, o de un sistema multi – analizador de medidas acústicas.
- ⇒ La ventaja de generarlo con un equipo externo es que resulta ser más robusto y fiable.
- ⇒ La ventaja de generarlo con un software específico o un sistema multi – analizador es que evitamos tener que cargar con el equipo externo, disminuyendo por lo tanto el número de bultos a transportar al lugar del ensayo.

3. *Analizador sonoro*

- ✓ Permite calcular L_1 , L_2 , L_{RF} y T a partir de los niveles medidos por el micrófono.
- ✓ Puede ser un sonómetro analizador o un sistema multi – analizador.
- ⇒ La ventaja de usar un sonómetro que esté dotado con un software específico para realizar la evaluación del aislamiento en edificios, es que podemos tener el micrófono de medida, el generador de ruido y el propio analizador sonoro en un mismo aparato. Además podemos almacenar la información en tiempo real para un procesado o análisis posterior. Por este motivo, de cara a la elaboración de este proyecto, emplearemos el sonómetro como analizador sonoro.
- ⇒ La ventaja de usar un sistema multi – analizador es que, además de las ventajas que posee un sonómetro analizador, podemos realizar medidas simultáneas (es decir, podemos medir el nivel de presión sonora con varios micrófonos a la vez), con lo que ahorramos tiempo a la hora de muestrear el campo sonoro. La mayor desventaja es que, al ser un equipo tan completo, es excesivamente caro para este tipo de medidas.

Cualquiera de las dos opciones de analizador sonoro será válida, siempre que el instrumento cumpla con las normas UNE – EN 61672 – 1: 2005. “Electroacústica. Sonómetros. Parte 1: Especificaciones”, UNE – EN ISO 3382 – 2: 2009. “Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios” o UNE – EN ISO 354: 2004. “Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante”, y UNE – EN 61260: 1997. “Filtros de banda de octava y de bandas de una fracción de octava”.

4. Fuente sonora

- ✓ Sirve para emitir la señal proveniente del generador de ruido.
- ✓ Debe poseer una radiación omnidireccional y uniforme. Generalmente se suele utilizar una fuente dodecaédrica.
- ✓ Esta fuente sirve tanto para el procedimiento de medida del nivel de presión sonora en el local emisor y receptor, como para el procedimiento de medida del tiempo de reverberación en el local receptor.

5. Amplificador de potencia

- ✓ Permite elevar el nivel de señal desde el generador a la fuente sonora.

6. Calibrador acústico

- ✓ Sirve para verificar la calibración del sistema de medida.
- ✓ Debe cumplir la norma UNE – EN 60942: 2005. “Electroacústica. Calibradores acústicos”, entregando 94 dB (1 Pa) de nivel de presión sonora a una frecuencia de 1 KHz.

7. Materiales difusores

- ✓ Son elementos que ayudan al campo sonoro a alcanzar las condiciones de campo difuso.
- ✓ Deben poseer un área de al menos 1 m² para cada difusor, tanto en el recinto emisor como en el receptor, para que generen un campo difuso con el mayor número de reflexiones posibles.

• Consideraciones a tener en cuenta en la disposición del ensayo

- ✓ La norma recomienda que si se tienen recintos con volúmenes diferentes, se utilice el de mayor tamaño como recinto emisor, situando la fuente sonora emisora a una distancia prudencial del elemento constructivo a ensayar para evitar la radiación directa sobre el mismo, tal y como se puede ver en la Figura 2.1*.

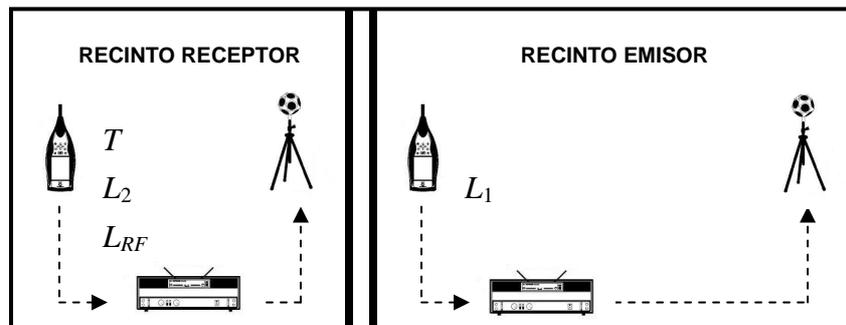


Figura 2.1 – Disposición del ensayo del método clásico.



*Esta simbología pertenece a una marca comercial, por lo que puede ser sustituida por otra que represente lo mismo. Sin embargo, de cara a la elaboración de este proyecto, se ha elegido ésta puesto que contribuye de una forma muy visual a la comprensión del texto.

⇒ El motivo de utilizar el recinto de mayor tamaño como emisor se encuentra directamente relacionado con la densidad de modos propios que definen la respuesta en frecuencia de una sala.

Para explicar esta circunstancia, debemos recordar la teoría relacionada con las ondas estacionarias que se producen en un recinto:

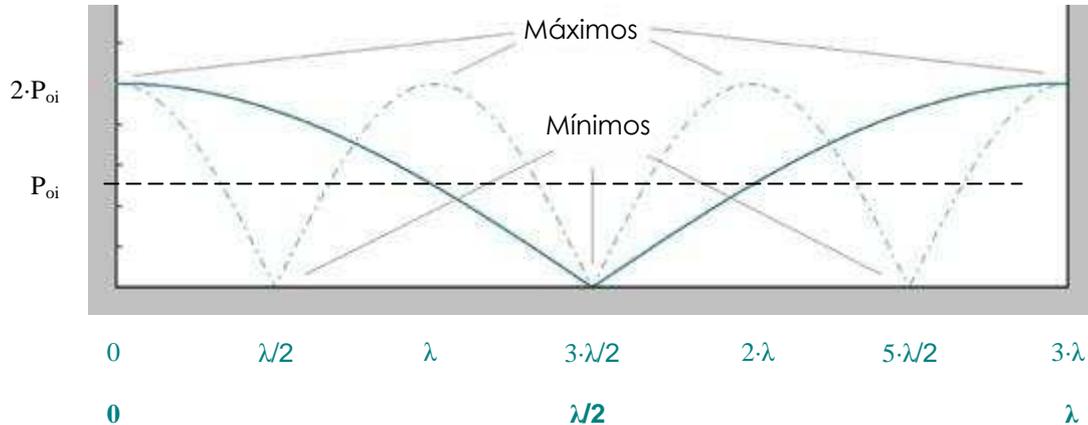


Figura 2.2 – Distribución de la presión acústica de ondas estacionarias.

Una onda estacionaria se forma debido a la interferencia de dos ondas coherentes*: la onda incidente (que proviene de la fuente sonora) y la onda reflejada en las superficies límite del recinto (que proviene de la pared, suelo o techo).

De este modo, la interferencia de las dos ondas, incidente y reflejada, origina un perfil de onda estacionaria, con máximos y mínimos distribuidos a lo largo del camino recorrido, los cuales están separados entre sí una distancia igual a $\lambda/2$, tal y como podemos ver en la Figura 2.2, donde se ha representado el perfil de dos ondas estacionarias de distinta frecuencia. También queda patente en esta ilustración, que debido a la naturaleza de las paredes, objetos, etc., las ondas estacionarias que se forman normalmente tienen un máximo de presión en la pared.

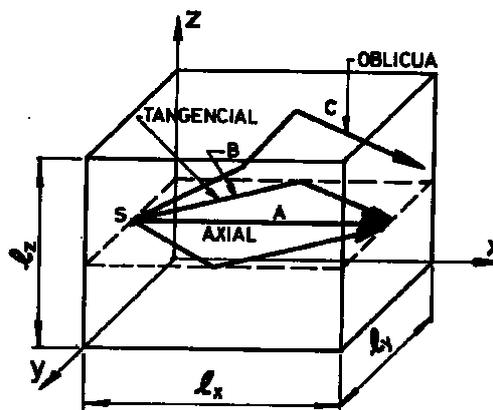


Figura 2.3 – Ondas axiales, tangenciales y oblicuas.

* Dos ondas se consideran "coherentes" cuando poseen la misma frecuencia.

En el campo de la acústica, a cada una de las ondas estacionarias generada en el interior de una sala, la denominamos “modo propio”. Teniendo en cuenta la forma en que las ondas estacionarias son generadas, podemos distinguir entre modo axial (aquel formado como resultado de una onda estacionaria fluctuante entre 2 superficies), tangencial (entre 4 superficies) u oblicuo (entre 6 superficies), tal y como se ilustra en la Figura 2.3.

Estos modos son las frecuencias propias o naturales que caracterizan un recinto para las que la onda acústica produce un perfil de onda estacionaria donde se pueden encontrar máximos y mínimos de presión sonora.

Por lo tanto, en la sala en la que emitimos con la fuente sonora elegida, se pueden producir fenómenos de resonancia que estarán relacionados con la naturaleza de la sala, su geometría, dimensiones y materiales, cuando la frecuencia de excitación coincida con una propia.

Es importante tener en cuenta que la densidad de modos propios dentro de un espacio aumenta conforme lo hace la frecuencia. Por consiguiente, a partir de una frecuencia (denominada frecuencia límite), la concentración de modos propios es tal, que se obtiene una respuesta en frecuencia de la sala cuyo espectro es prácticamente plano. Para hallar la frecuencia límite a partir de la cual los modos propios no tienen una influencia en la respuesta en frecuencia de la sala se emplea la expresión 2.1.

$$f_{\text{lim}} \text{ [Hz]} = 1849 \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{med}}}{V}} \quad (2.1)$$

donde,

- T_{med} [s] es el tiempo de reverberación medio, el cual se obtiene de promediar T en las bandas de octava centradas en 500 Hz y 1000 Hz.
- V [m³] es el volumen de la sala.

De esta expresión se deduce que la incidencia de los modos propios en un determinado recinto, es inversamente proporcional a las dimensiones del mismo. Por lo tanto, cuanto mayor sea el volumen de la sala emisora, menor será el efecto negativo de los modos propios en la respuesta en frecuencia de la misma. De esta forma, la frecuencia límite bajará, obteniéndose así un espectro mucho más plano en el recinto emisor que en el receptor, condición que nos interesa de cara al ensayo.

- ✓ La norma también recomienda que, en el caso de que alguno de los recintos de ensayo presente una geometría irregular, éste se utilice como emisor.
- ⇒ El motivo de esta recomendación también se encuentra muy ligado a los modos propios: Las salas que poseen una geometría regular, en las que las superficies límites son paralelas dos a dos, favorecen la generación de modos propios. Por lo tanto, si se elige como sala emisora aquella que presente una geometría irregular, se reducirá la incidencia de los modos propios en la respuesta en frecuencia del recinto emisor.

2.2.2. Medida de las magnitudes a partir del método clásico

- Medida del nivel de presión sonora en ambos recintos

El nivel de presión sonora se mide en ambos recintos (emisor y receptor), puesto que a partir de ellos, se puede obtener el aislamiento acústico bruto a ruido aéreo entre locales.

Para medir el nivel de presión sonora se empleará un micrófono (fijo o móvil). Por las razones explicadas anteriormente y de cara a la elaboración de este proyecto, dejaremos de lado el micrófono móvil y nos centraremos en el uso de un micrófono fijo incorporado a un sonómetro analizador. En estas circunstancias, la norma indica que:

- ✓ Se deben efectuar al menos 10 medidas tanto del nivel emisor como del nivel receptor en el espacio, para compensar con ellas la difusión “no ideal” del campo sonoro.

Una vez efectuadas las distintas medidas del nivel de presión sonora en cada uno de los dos recintos, es posible calcular el nivel medio de presión sonora en cada recinto, el cual se define como la media energética de los niveles que determinan la intensidad del sonido que genera una presión sonora instantánea (es decir, del sonido que puede medirse en un punto concreto del espacio).

Tal y como se indica en la norma UNE – EN ISO 140 – 4: 1999 en caso de utilizar un micrófono fijo para muestrear el campo sonoro, los niveles de presión sonora medidos en cada posición deben promediarse de *forma energética* para todas ellas, de este modo el nivel medio vendrá dado por la expresión 2.2.

$$L_x \text{ [dB]} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) \quad (2.2)$$

donde para cada una de las 16 frecuencias de interés,

- L_x [dB] es el nivel medio de presión sonora en un recinto, ya sea emisor ($X = 1$) o receptor ($X = 2$).
- L_j [dB] es el nivel de presión sonora medido en n posiciones diferentes dentro del recinto.

A pesar de que la normativa indique lo contrario, existe la posibilidad de realizar el promedio de niveles de *forma aritmética*. El promedio aritmético (ecuación 2.3) puede aproximarse al energético (ecuación 2.2) siempre que los niveles a promediar difieran poco entre sí (es decir, que $L_1 \approx L_2 \dots L_n$, o que la diferencia entre niveles sea inferior a 6 dB). Sin embargo, dicha forma de proceder no es recomendable.

$$L \text{ [dB]} \approx \bar{L} \text{ [dB]} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_j \quad (2.3)$$

- ✓ El tiempo de promediado para cada posición de micrófono en cada banda de frecuencia, tendrá una duración como mínimo de 6 s para frecuencias centrales menores que 400 Hz y de al menos 4 s para bandas de frecuencias centrales mayores.
 - ✓ Habrá que respetar unas distancias mínimas para que el registro se realice correctamente, las cuales deben ser:
- ⇒ *Al menos 0,5 m entre cualquier posición de micrófono y las superficies límites de la habitación o de objetos*

El motivo por el cual se debe respetar esa distancia, se encuentra directamente relacionado con la teoría de modos propios que acabamos de ver. Concretamente, con los máximos y mínimos de presión sonora que se pueden encontrar en un perfil de onda estacionaria.

Puesto que las paredes de la sala suponen una superficie límite para la onda sonora, es ahí donde coinciden los máximos de presión de todas las ondas. Por lo tanto, se debe situar el micrófono de medida lo más alejado posible de las paredes para evitar esa zona de concentración de máximos de presión.

Para salas de dimensiones normales (como un dormitorio), estos máximos suponen un realce de la presión sonora en la pared, aumentando la medida del nivel de presión sonora si se midiese en ese punto de la sala, pudiendo así desvirtuar el valor de aislamiento calculado. Situando el micrófono a más de 0.5 m de distancia, se minimiza este efecto.

⇒ Como mínimo 0,7 m entre posiciones de micrófono

Para explicar esta cuestión, podemos hacer uso de parte del razonamiento anterior:

Realizar el ensayo correctamente, requiere repartir de manera uniforme las posiciones de micrófono en el local de ensayo. La condición ideal de medida es que el campo sonoro sea completamente difuso. Sin embargo, normalmente no lo es, por lo que se muestrea en distintos puntos del campo sonoro para contemplar la no perfecta difusión del mismo.

Con el fin de evitar que el micrófono capte siempre un mínimo o un máximo de presión de las ondas estacionarias que se forman en el recinto, se debe respetar esa distancia mínima que figura en la norma, la cual está relacionada con la longitud de onda.

Para calcular la mínima distancia entre posiciones de micrófono, hay que tener en cuenta la mínima frecuencia a la que vamos a trabajar. Para nuestro ensayo, el menor valor de frecuencia empleado es de 100 Hz.

Sabemos que la distancia (x) entre un máximo y un mínimo de presión viene dada por la ecuación 2.4.

$$x \text{ [m]} = \frac{\lambda}{2} \quad (2.4)$$

donde λ [m] es la longitud de onda, la cual viene dada por el cociente entre c [m/s], que es la velocidad del sonido en el aire, y f [Hz], que resulta ser la frecuencia de excitación, tal y como se indica en la ecuación 2.5.

$$\lambda \text{ [m]} = \frac{c}{f} \quad (2.5)$$

Por lo tanto, sustituyendo valores en las ecuaciones 2.5 y 2.4, obtendremos las expresiones 2.6 y 2.7.

$$\lambda \text{ [m]} = \frac{c}{f} = \frac{343}{100} = 3,43 \quad (2.6)$$

$$x \text{ [m]} = \frac{\lambda}{2} = \frac{3,43}{2} = 1,715 \quad (2.7)$$

De este modo, según la ecuación 2.7, encontraremos un máximo o un mínimo de presión cada 1,715 m si establecemos como punto de referencia la pared. Posicionando el micrófono de medida justo en la mitad de esa distancia (cada 0,8575 m respecto del paramento), podremos asegurar que el registro del nivel de presión respeta la distancia mínima, asegurando captar zonas cercanas tanto a máximos como a mínimos de presión, permitiendo que el muestreo del campo sonoro sea lo más homogéneo posible. Distancias más pequeñas, darían lugar a un muestreo menos uniforme, ya que se estaría registrando niveles de presión más similares.

⇒ Como poco a 1 m entre cualquier posición de micrófono y la fuente emisora

Para justificarlo, explicaremos el concepto conocido como “distancia crítica”. Esta distancia es aquella en donde el nivel de presión sonora del campo directo es igual al nivel de presión sonora del campo reverberante, tal y como se ilustra en la Figura 2.4.

La distancia crítica informa de en qué puntos del campo acústico predomina el campo directo o el campo reverberante. Para puntos más cercanos a la fuente que la distancia crítica, el campo directo será el dominante, y para puntos más alejados será más importante el campo reverberante.

Por lo tanto, a partir de esta distancia, el micrófono de medida registrará menor campo directo, y mayor campo reverberante, que es el que nos interesa.

De este modo, para que se cumpla lo que exige la norma, la distancia crítica debe ser como mínimo igual a 1 m.

La expresión matemática que define la distancia crítica viene dada por la ecuación 2.8.

$$D_c \text{ [m]} = 0,141 \cdot \sqrt{Q \cdot R} \quad (2.8)$$

donde,

- Q es el factor de directividad (cuyo valor es igual a 1 para el uso de una fuente omnidireccional).
- $R \text{ [m}^2\text{]}$ es la constante de la sala.

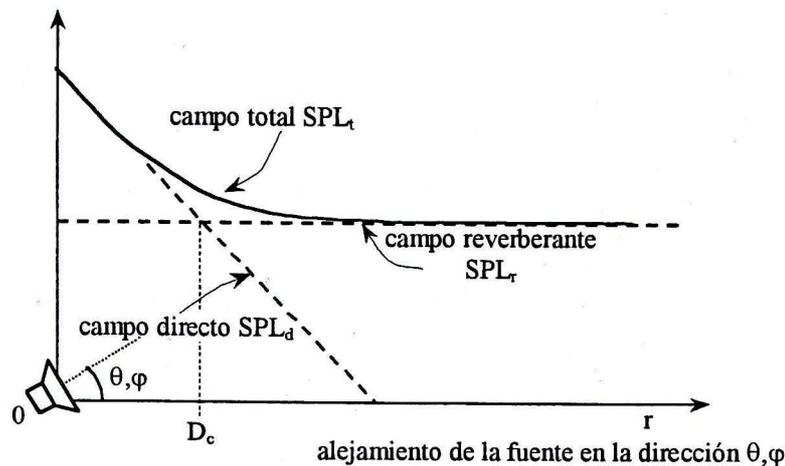


Figura 2.4 – Campos producidos por una fuente única y distancia crítica.

Por lo tanto, para salas normales (como dormitorios, salones, aulas, despachos...) esa distancia asegura estar fuera del campo directo. Sin embargo, para salas mayores, o menos absorbentes, convendría aumentar dicha distancia.

- Medida del tiempo de reverberación en el local receptor

El tiempo de reverberación es una magnitud muy importante, que depende de la forma del recinto, de la absorción de los materiales y sobre todo del campo reverberante en el local. Se mide en el recinto receptor para recabar información de las características intrínsecas del propio local y para corregir el parámetro de aislamiento, puesto que si no fuera así, no podríamos independizar la medida y en consecuencia el aislamiento dependería fuertemente del mobiliario o de la respuesta de la sala. Así se intenta independizar la medida del nivel reverberante del local receptor, el cual depende de su tamaño, forma y mobiliario, para tratar de considerar exclusivamente, la energía sonora que penetra en el local receptor.

La manera de medir el tiempo de reverberación será combinando por cada posición de la fuente sonora al menos 3 posiciones del micrófono fijo, efectuando como mínimo 2 medidas del mismo en cada una de las diferentes combinaciones. Lo que implica un mínimo de 6 medidas del tiempo de reverberación. Normalmente se utiliza el método de ruido interrumpido.

- Medida del nivel de presión sonora del ruido de fondo en el local receptor

Siempre que se realice un ensayo, se debe medir el ruido de fondo para analizar la diferencia en [dB] que existe entre L_2 y L_{RF} , asegurando así que las observaciones en el recinto receptor no estén afectadas por sonidos ajenos (principalmente, ruidos del exterior o ruido interno presente en el mismo). Dado que no existe un número mínimo de realizaciones especificado en la norma, efectuar 3 medidas del mismo podría ser una buena elección.

El ruido de fondo sólo se mide en el recinto receptor, puesto que en el recinto emisor, al ser el local en el que se sitúa la fuente emisora con el nivel de presión sonora deseado, se obtiene una relación señal a ruido muy alta y no se suelen presentar problemas por ruido de fondo. Sin embargo, en el recinto receptor, el nivel de presión sonora no se puede fijar, por lo que en éste local, la relación señal a ruido puede ser cualquiera.

Cuando el ruido de fondo hace presencia en el recinto receptor durante un ensayo, se pueden dar 3 escenarios de medida:

1. Que $L_2 - L_{RF} \geq 10$ [dB], por lo que el ruido de fondo no presenta problemas.
2. Que $L_2 - L_{RF} < 10$ [dB], por lo que el ruido de fondo puede afectar al nivel de presión sonora medido en el recinto receptor. Para eliminar esta afección, se emplea la expresión 2.9.

$$L_2' \text{ [dB]} = 10 \cdot \log \left(10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10} \right) \quad (2.9)$$

donde para cada una de las 16 frecuencias bajo estudio,

- L_2' [dB] es el nivel de señal corregido por ruido de fondo (es decir, el nivel medio de presión sonora calculado en el recinto receptor en ausencia del ruido de fondo).
 - L_{RF} [dB] el nivel medio de ruido de fondo.
 - L_2 [dB] el nivel medio de presión sonora que se obtiene de medir niveles en el recinto receptor en presencia de ruido de fondo.
3. Que $L_2 - L_{RF} \leq 6$ [dB], por lo que el ruido de fondo afecta fuertemente a la medida del nivel de presión sonora en el recinto receptor. En este caso habrá que prescindir de la expresión 2.9 y aplicar a L_2 una corrección máxima de 1,3 [dB] por ruido de fondo, tal y como se define en la igualdad 2.10, indicando en el informe de ensayo que el índice de valoración de aislamiento calculado a partir de este nivel es un límite inferior de la medición

$$L_2' \text{ [dB]} = L_2 - 1,3 \quad (2.10)$$

En estas circunstancias se tiene el problema de que la medida no es fiable, por lo que se debe considerar esa medida como una "cota", ya que se desconoce el valor de L_2 (puesto que el ruido de fondo lo enmascara y no es fácil saber cuanto nivel de ruido o de señal hay exactamente en ese nivel medido en el recinto receptor en presencia de ruido de fondo).

Por lo tanto, la expresión 2.10 puede reescribirse como la ecuación 2.11, dado que ésta cota debe ser como máximo ese valor para que se garantice que el nivel medido en el recinto receptor representa únicamente a la señal y no a la señal con ruido.

$$L_2' \text{ [dB]} \leq L_2 - 1,3 \quad (2.11)$$

2.2.3. Índices de valoración del aislamiento a ruido aéreo entre locales

Una vez estimadas las magnitudes L_1 , L_2 , L_{RF} y T por medio del método clásico, es posible definir el aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales a partir de al menos cinco índices distintos, los cuales se describen a continuación.

1. Diferencia de niveles

Este índice viene dado por la expresión 2.12, la cual vemos que es idéntica a la expresión 1.1 que propusimos en la teoría.

$$D \text{ [dB]} = L_1 - L_2 \quad (2.12)$$

donde para cada una de las 16 frecuencias de interés,

- L_1 [dB] es el nivel medio de presión sonora medido en el recinto emisor.
 - L_2 [dB] es el nivel medio de presión sonora medido en el recinto receptor.
- ✓ En definitiva, la *diferencia de niveles* no es más que el aislamiento bruto y resulta ser el índice más básico que se puede calcular.

2. Diferencia de niveles normalizada

Es la diferencia de niveles correspondiente a un área de absorción de referencia en el recinto receptor y viene dada por la expresión 2.13.

$$D_n \text{ [dB]} = D - 10 \cdot \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (2.13)$$

donde para cada una de las 16 frecuencias bajo estudio,

- A_0 [m²] es el área de absorción de referencia (cuyo valor es igual a 10).
- A [m²] es el área de absorción acústica equivalente, la cual se obtiene con la fórmula de Sabine (ecuación 2.14).

$$A \text{ [m}^2\text{]} = \frac{0,161 \cdot V}{T} \quad (2.14)$$

siendo V [m³] el volumen y T [s] el tiempo de reverberación, ambos referidos al recinto receptor.

3. Diferencia de niveles estandarizada

Es la diferencia de niveles correspondiente a un valor de referencia del tiempo de reverberación en el recinto receptor y viene dada por la expresión 2.15.

$$D_{nT} \text{ [dB]} = D + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (2.15)$$

donde para cada una de las 16 frecuencias de interés,

- T [s] es el tiempo de reverberación en el recinto receptor.
 - T_0 [s] es el tiempo de reverberación de referencia (cuyo valor es igual a 0,5).
- ✓ La *diferencia de niveles estandarizada*, no es más que la *diferencia de niveles* para la que también tenemos en cuenta el tiempo de reverberación en el recinto receptor.
- ✓ Tanto el índice D_n como el índice D_{nT} consideran las condiciones del recinto receptor, lo cual los convierte en índices importantes. Sin embargo, la mayoría de las normativas y literatura prefieren el D_{nT} .

4. Índice de reducción sonora aparente

Es el índice que contempla la potencia sonora incidente sobre el elemento separador de ambos recintos y la potencia sonora total transmitida al recinto receptor, incluyendo la potencia sonora transmitida a través de elementos laterales o de otros componentes. Viene dado por la expresión 2.16.

$$R' \text{ [dB]} = 10 \cdot \log \left(\frac{W_1}{W_2 + W_3} \right) \quad (2.16)$$

donde para cada una de las 16 frecuencias bajo estudio,

- W_1 [W] es la potencia acústica incidente sobre el elemento constructivo.
- W_2 [W] es la potencia sonora transmitida a través del elemento separador.
- W_3 [W] es la potencia sonora transmitida a través de los elementos laterales o de otros componentes.
- La suma de W_2 y W_3 será la potencia acústica total transmitida al recinto receptor.

Si relacionamos la ecuación 2.12 con la ecuación 2.16 podemos llegar a la conclusión de que la *diferencia de niveles* y el *índice de reducción sonora aparente* resultan ser lo mismo, pero expresado de manera diferente, tal y como podemos ver en el siguiente desarrollo matemático que se expone a continuación:

$$L_{w_1} [\text{dB}] = 10 \cdot \log \left(\frac{W_{emisor}}{W_0} \right) \quad (2.17)$$

$$L_{w_2} [\text{dB}] = 10 \cdot \log \left(\frac{W_{receptor}}{W_0} \right) \quad (2.18)$$

donde para cada una de las 16 frecuencias de interés,

- L_{w_1} es el nivel de potencia sonora en el local emisor.
- W_{emisor} [W] la potencia acústica en el local emisor.
- L_{w_2} el nivel de potencia sonora en el local receptor.
- $W_{receptor}$ [W] la potencia acústica en el local receptor.
- W_0 [W] la potencia acústica de referencia (cuyo valor es igual a 10^{-12}).

Si escribimos la expresión 2.12 en función de los niveles de potencia anteriores (expresiones 2.17 y 2.18), podemos obtener que:

$$\begin{aligned} D [\text{dB}] &= L_1 - L_2 = L_{w_1} - L_{w_2} = 10 \cdot \left[\log \left(\frac{W_{emisor}}{W_0} \right) - \log \left(\frac{W_{receptor}}{W_0} \right) \right] = \\ &= 10 \cdot \left[\log W_{emisor} - \log W_0 - \log W_{receptor} + \log W_0 \right] = \\ &= 10 \cdot \left[\log W_{emisor} - \log W_{receptor} \right] = 10 \cdot \log \left(\frac{W_{emisor}}{W_{receptor}} \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

En efecto, tal y como podemos comprobar, la expresión 2.16 resulta ser idéntica a la 2.19, donde W_{emisor} [W] es la potencia acústica en el local emisor (es decir, la potencia acústica incidente sobre el elemento constructivo, W_1 [W]) y $W_{receptor}$ [W] la potencia acústica en el local receptor (o sea, la potencia acústica total que ha sido transmitida al recinto receptor, W_2 [W] + W_3 [W]).

Dado que los campos sonoros se suponen lo suficientemente difusos en ambos recintos, este índice generalmente se evalúa recurriendo a la expresión 2.20, donde S [m²] es el área del elemento separador entre ambos recintos.

$$R' [\text{dB}] = D + 10 \cdot \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (2.20)$$

- ✓ El cálculo de este índice resulta ser muy útil cuando se necesita averiguar si existen acoplamientos en la pared debido a puentes acústicos (circunstancia que reduce en gran medida el aislamiento de un paramento), además de aportar información del nivel de potencia sonora que realmente está recibiendo el paramento.

5. Índice global de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales

Como complemento a la normativa anteriormente vista para efectuar medidas de aislamiento a ruido aéreo entre locales, existe la norma UNE – EN ISO 717 – 1: 1997. “Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1 – Aislamiento a ruido aéreo”. El objetivo de la misma es normalizar un método por el cual la dependencia frecuencial del aislamiento a ruido aéreo pueda convertirse en un sólo número que caracterice el comportamiento acústico global de un paramento.

La norma UNE – EN ISO 717 – 1: 1997 define magnitudes globales para medir el aislamiento a ruido aéreo en edificios y en elementos de construcción (como paredes, suelos, puertas y ventanas), las cuales se determinan a partir de los resultados de medición, realizados en bandas de tercio de octava o de octava, de acuerdo con las normas internacionales UNE – EN ISO 140 – 3: 1995, UNE – EN ISO 140 – 4: 1999, UNE – EN ISO 140 – 5: 1999 y UNE – EN ISO 140 – 10: 1991 (UNE – EN 20140 – 10: 1994).

Dichas magnitudes pretenden clasificar el aislamiento acústico simplificando la formulación de los requisitos acústicos en los códigos de la edificación. Su objetivo es la determinación de un índice de valoración acústico único y global que caracterice los resultados obtenidos en el ensayo de medición. En definitiva, se trata de un número que resume el resultado del procedimiento de medida, donde se busca la sencillez en el manejo de documentación. De cara a la elaboración de este proyecto, a este índice de valoración se le ha denominado índice global de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales.

Con respecto al aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales, esta norma presupone que cualquier índice de aislamiento calculado (D , D_n , D_{nT} o R') presenta un espectro más o menos similar al de la curva de referencia dada por la Figura 2.5 (la cual se obtiene de representar los valores de la Tabla 2.1).

f [Hz]	Ref. [dB]
50	-
63	-
80	-
100	33
125	36
160	39
200	42
250	45
315	48
400	51
500	52
630	53
800	54
1000	55
1250	56
1600	56
2000	56
2500	56
3150	56
4000	-
5000	-

Tabla 2.1

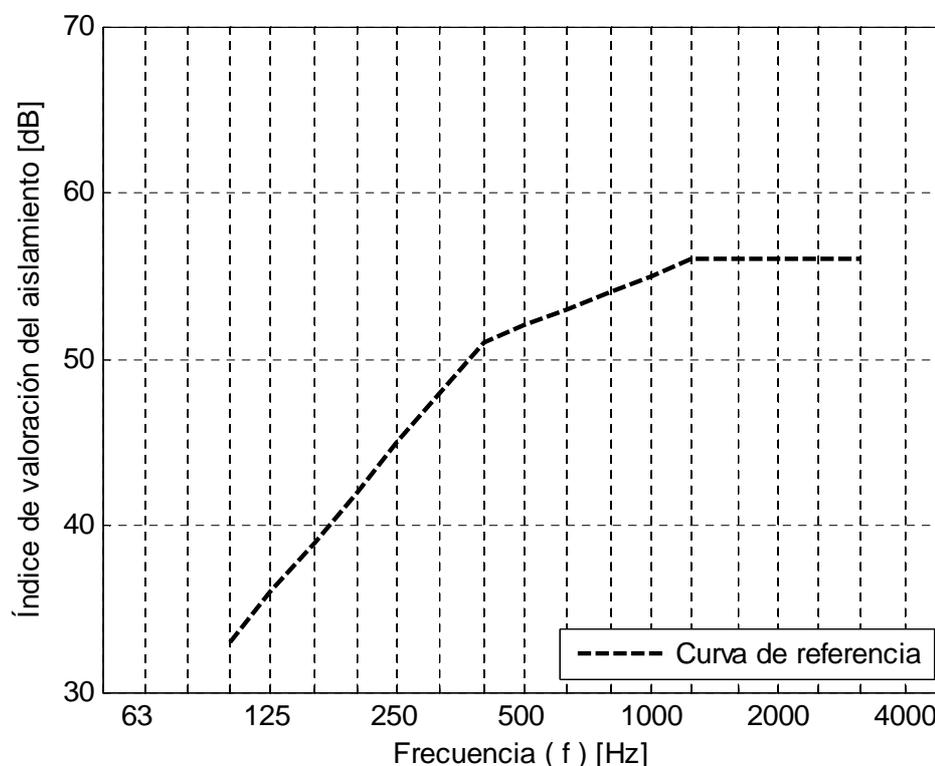


Figura 2.5 – Curva de referencia en bandas de tercio de octava.

La norma UNE – EN ISO 717 – 1: 1997 incluye un procedimiento para el cálculo del índice global de aislamiento a ruido aéreo, que se denomina “método de comparación”. En éste se indica que para valorar los resultados obtenidos en el caso de tercios de octava, con precisión de 0.1 dB, se desplaza la curva de referencia en saltos de 1 dB hacia la curva medida (la cual deberá representarse en la misma gráfica que la curva de referencia) hasta que la suma de desviaciones desfavorables sea lo mayor posible, pero menor o igual que 32 dB. Se considera una desviación desfavorable en una determinada frecuencia cuando el resultado de las mediciones es inferior al valor de referencia. El valor de aislamiento (por ejemplo el índice D_{nT}) de la curva de referencia a 500 Hz, después del desplazamiento, será el valor del índice global de aislamiento de la solución constructiva y se definirá como $D_{nT,w}$. Del mismo modo, podrá realizarse un procedimiento similar para los índices D , D_n o R' , siendo éstos definidos como D_w , D_{nw} o R_w' .

A modo de ejemplo ilustrativo de lo que nos permite hacer esta norma, se ha desarrollado mediante un software matemático (Matlab 7.4), una sencilla aplicación que la implementa para bandas de tercio de octava. En la Figura 2.6 se presenta el flujograma de la misma, en el que se muestra el diseño del “método de comparación” desarrollado en la norma para el cálculo del índice global de aislamiento a ruido aéreo entre locales.



Figura 2.6 – Flujograma de la implementación del método de comparación de la norma UNE – EN ISO 717 – 1: 1997 para tercios de octava.

2.3. MEDIDAS ALTERNATIVAS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO ENTRE LOCALES: USO DE INTENSIMETRÍA ACÚSTICA Y DE SECUENCIAS MLS

2.3.1. Introducción

A pesar de que el “método clásico” sea el procedimiento mayormente empleado en medidas de aislamiento acústico a ruido aéreo, existen también otros “métodos alternativos” por los que también puede evaluarse el aislamiento, como son la técnica de barrido intensimétrica o la generación de secuencias MLS. Métodos los cuales se expondrán a continuación.

2.3.2. Medida de aislamiento empleando intensimetría acústica

1. Circunstancias que fomentan el uso de medidas de intensidad

Por los métodos de presión expuestos en las normas UNE – EN ISO 140 – 4: 1999, UNE – EN ISO 140 – 14: 2005 y UNE – EN ISO 717 – 1: 1997 se puede llevar a cabo la medida y evaluación del aislamiento acústico de forma bien contrastada y fiable, pero a nivel global. Es decir, del paramento de separación en su conjunto, sin capacidad de discernir las vías de transmisión de las diferentes partes del elemento separador, los defectos constructivos en las uniones, puentes acústicos, zonas débiles o vías de transmisión indirecta.

La técnica intensimétrica permite llevar a cabo tal discriminación, aportando información cuantitativa de los posibles puentes acústicos, y en adecuadas condiciones de medida, puede utilizarse para evaluar el aislamiento individual en soluciones constructivas compuestas por diferentes paneles. La normativa relativa a esta técnica es la ISO 15186 – 2: 2003. “*Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity. Part 2: Field measurements*”.

2. Generalidades

- *Magnitudes medibles o calculables*
- ✓ Intensidad sonora en el recinto receptor, I_2 [W/m²].
- *Método de medida y condiciones que se deben dar para efectuarlo*

El método de medida que permite evaluar la intensidad sonora en el recinto receptor es la “técnica del barrido” (técnica la cual viene definida en el apartado 6.5.5.1 de la norma ISO 15186 – 2: 2003). Dicho método de medida no requiere condición especial alguna para efectuarse correctamente.

- *Equipo necesario para poder llevar a cabo el ensayo*

⇒ *Sonda de intensidad*

Es el instrumento de medida que permite medir la intensidad sonora, magnitud que se define como un vector que aporta información sobre la cantidad de energía acústica que pasa a través de un área definida, la dirección y el sentido en el que fluye. Se define según la ecuación 2.21.

$$\vec{I} \text{ [W/m}^2\text{]} = \vec{P} \cdot \vec{u}_r \quad (2.21)$$

donde en un punto concreto del espacio,

- \vec{P} [Pa] es la presión media de la onda sonora.
- \vec{u}_r [m/s] es la velocidad instantánea de las partículas del medio (en este caso, el aire) en una dirección r .

Para medir la intensidad sonora existen dos tecnologías claramente definidas: La primera, basada en la medida de la presión sonora y la velocidad de las partículas (con una sonda del “tipo $p - u$ ”), y la segunda, basada en la medida del gradiente de presión sonora en dos puntos muy próximos del espacio (con una sonda del “tipo $p - p$ ”). Puesto que la segunda tecnología es la solución más utilizada, se expone a continuación las propiedades y características de este tipo de sondas.

Una sonda “tipo $p - p$ ” está formada por dos micrófonos de medida enfrentados (A y B), los cuales se encuentran separados cierta distancia (Δr [m]) por un espaciador fijo, tal y como se ilustra en la Figura 2.7. Ambos micrófonos deben ser lo más parecido posible.

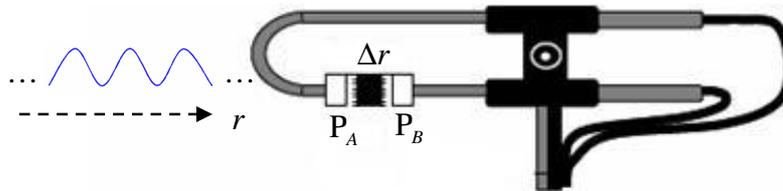


Figura 2.7 – Sonda de intensidad “tipo $p - p$ ”.

Con esta configuración, el gradiente de presión puede ser aproximado mediante la medida de la presión en dos puntos (P_A [Pa] y P_B [Pa]) 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.

Éste método de aproximación puede definirse matemáticamente mediante la relación de Euler para mecánica de fluidos (que se basa en la 2ª ley de Newton), describiendo a través de la ecuación 2.22 el movimiento para un fluido ideal.

Estableciendo un símil con el funcionamiento de una sonda de este tipo, será la variación de la presión con la distancia entre micrófonos lo que acelere el aire en una determinada dirección r . Y dado que la aceleración instantánea de una partícula viene dada por la variación de la velocidad con el tiempo, y teniendo en cuenta que el aire es un fluido y posee una cierta densidad ρ [Kg/m³], es posible reinterpretar los parámetros de la relación de Euler en términos que definen cómo la sonda de intensidad obtiene el gradiente de presión. Dicha reinterpretación figura entre paréntesis y en letra cursiva en cada uno de ellos.

$$-\nabla P [\text{Pa}] = -\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \quad (2.22)$$

donde los parámetros que definen la fórmula son,

- ∇P [Pa], el gradiente de presión (*gradiente de presión entre ambos micrófonos*)
- P [Pa], que es la presión a la que están sometidas las partículas en el fluido (*presión de la onda sonora medida*).
- r , que es la dirección de propagación de las partículas a lo largo del fluido (*dirección de propagación de las partículas en el aire*).
- ρ [Kg/m³], que es la densidad del fluido (*densidad del aire*).
- u [m/s], que es la velocidad instantánea de las partículas en el fluido (*velocidad instantánea de las partículas en el aire*).
- t [s], que es el tiempo que tardan las partículas en desplazarse dentro del fluido (*tiempo que tardan las partículas en desplazarse en el aire*).

Como la velocidad media de las partículas en el aire dentro de un campo sonoro, u_r , no puede obtenerse directamente, y el gradiente de presión es proporcional a la aceleración de las mismas, la velocidad media de éstas se puede calcular integrando el gradiente de presión en la dirección r respecto del tiempo t , tal y como se define en la expresión 2.23.

$$u_r [\text{m/s}] = -\frac{1}{\rho} \cdot \int \frac{\partial P}{\partial r} dt, \quad (2.23)$$

donde el gradiente de presión se aproxima dividiendo la diferencia de presiones entre la distancia que separa ambos micrófonos, de esta forma

$$\nabla P [\text{Pa}] = \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{P_B - P_A}{\Delta r} \quad (2.24)$$

(Esta aproximación es cierta siempre que $\Delta r \ll \ll \lambda$, siendo λ [m] la longitud de onda de la onda sonora medida. Si hay un cambio de fase entre ambos micrófonos, ya no lo es.)

Así pues, la expresión 2.23 puede reescribirse como

$$u_r [\text{m/s}] = -\frac{1}{\rho \cdot \Delta r} \cdot \int (P_B - P_A) dt \quad (2.25)$$

De este modo, la intensidad sonora definida por la expresión 2.21 podrá reescribirse para este modelo de sonda como la ecuación 2.26.

$$\bar{I} [\text{W/m}^2] = \left(\frac{P_A + P_B}{2} \right) \cdot \left[-\frac{1}{\rho \cdot \Delta r} \cdot \int (P_B - P_A) dt \right] = \frac{P_A + P_B}{2 \cdot \rho \cdot \Delta r} \cdot \int (P_A - P_B) dt \quad (2.26)$$

donde, al tratarse de un vector, puede ser positiva o negativa, dependiendo de la dirección de propagación r de la onda sonora.

Este tipo de sonda necesita un analizador que realice los cálculos necesarios para obtener la intensidad sonora, haciendo un uso directo de sumadores e integradores, tal y como se puede ver en la Figura 2.8. Los preamplificadores y convertidores de corriente acomodan el nivel de señal a analizar, y los filtros digitales realizan el análisis espectral de la onda sonora para posteriormente poder ser evaluada en un software acústico.

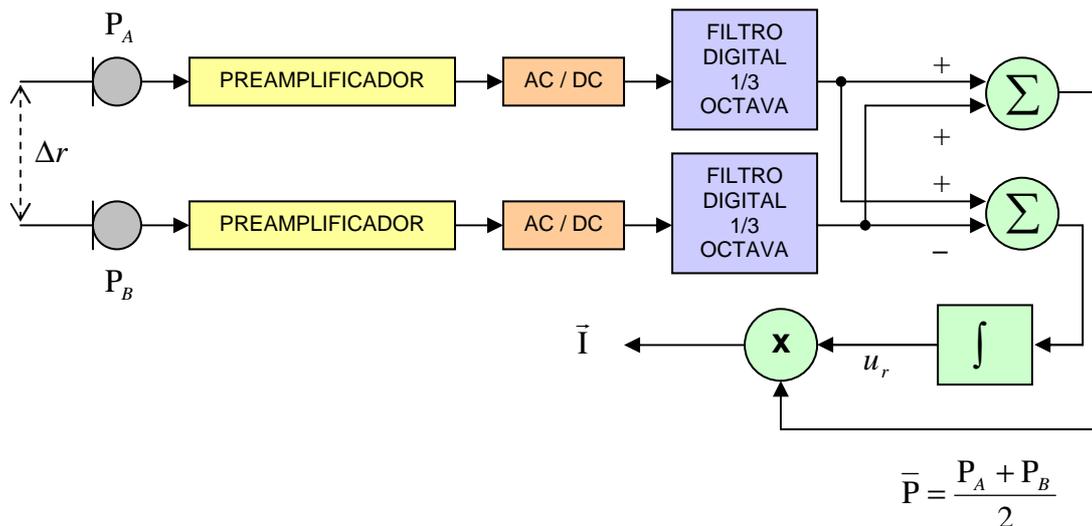


Figura 2.8 – Esquema de bloques del analizador de una sonda “tipo p – p”.

⇒ *Generador de ruido*

Será idéntico a los vistos en el “método clásico”.

⇒ *Analizador sonoro*

Este instrumento permite calcular el nivel de presión sonora en el recinto receptor, L_2 , a partir de la intensidad sonora medida en el recinto receptor. Puede ser similar a los vistos en el “método clásico” siempre que el instrumento cumpla con las normas UNE – EN 61672 – 1: 2005. “*Electroacústica. Sonómetros. Parte 1: Especificaciones*” y UNE – EN 61260: 1997. “*Filtros de banda de octava y de bandas de una fracción de octava*”.

⇒ *Fuente sonora*

Será idéntica a la vista en el “método clásico”. Emite la señal proveniente del generador de ruido y sirve para el procedimiento de medida del nivel de presión sonora en el local receptor.

⇒ *Amplificador de potencia*

Posee la misma función que en el “método clásico”.

⇒ *Calibrador acústico*

Posee la misma función que en el “método clásico”. Sin embargo, en este caso, el calibrador debe además verificar la fase entre ambos micrófonos para que la sonda y el analizador proporcionen un índice presión – intensidad adecuado.

• *Consideraciones a tener en cuenta en la disposición del ensayo*

Si se desea realizar un ensayo de aislamiento a ruido aéreo entre locales empleando técnicas intensimétricas, los expertos recomiendan que se emplee la medida clásica de presión en el recinto emisor y la medida de intensidad acústica en el recinto receptor, tal y como puede verse en la Figura 2.9.

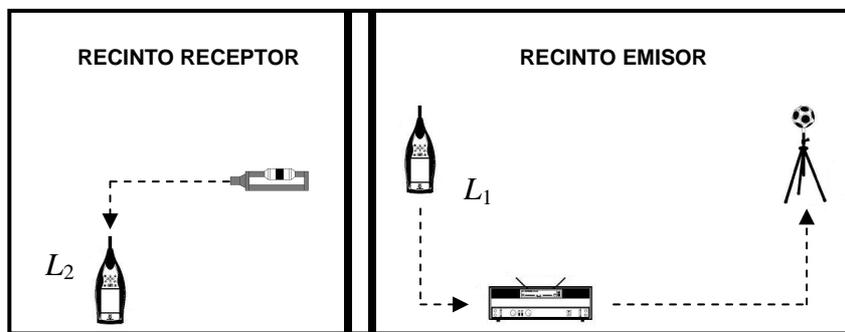


Figura 2.9 – Disposición del ensayo empleando intensimetría acústica.



En el momento de decidir sobre los locales emisor y receptor, se empleará el mismo criterio del método clásico, empleando en este caso una potencia de fuente algo mayor que en el caso del método tradicional, para aumentar el nivel y así la calidad de las adquisiciones en el local receptor, pero sin generar transmisiones indirectas demasiado elevadas.

3. Medida de las magnitudes a partir de técnicas intensimétricas

- *Medida de la intensidad en el recinto receptor*

Para obtener correctamente la intensidad sonora en el recinto receptor empleando la técnica del barrido, se debe:

- ✓ Definir una superficie imaginaria inicial de medida alrededor de la fuente bajo ensayo (ver Figura 2.12).
- ✓ Seleccionar un espaciador fijo a utilizar para efectuar las medidas, puesto que dependiendo del mismo, el margen de frecuencias a medir será diferente, tal y como lo ilustra la Figura 2.10. En general, se recomienda usar 2 espaciadores diferentes: Un espaciador de 50 mm para efectuar medidas entre 50 y 500 [Hz] y otro de 12 mm para medidas entre 500 y 5000 [Hz].

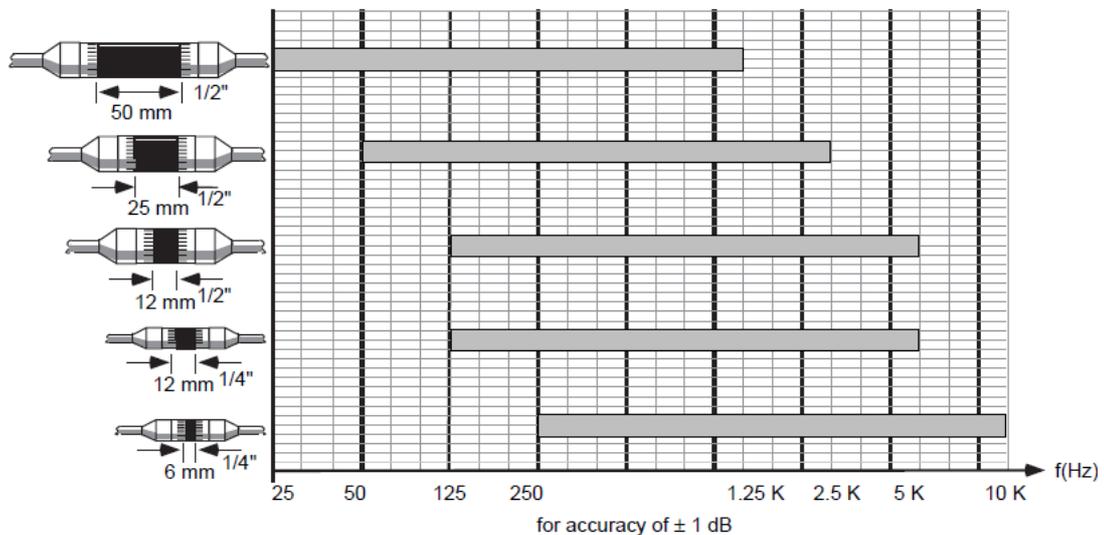


Figura 2.10 – Evaluación del margen frecuencial por diferentes espaciadores.

Esta forma de actuación se encuentra relacionada con la frecuencia de la señal sonora que se va a medir y con la aproximación asumida para estimar el gradiente de presión entre ambos micrófonos ($\Delta r \ll \ll \lambda$). Cuanto menor sea el valor de la frecuencia a medir, mayor será la longitud de onda de la señal, y en consecuencia, el espaciador a utilizar deberá ser más grande (motivo por el cual los espaciadores para medir intensidad a frecuencias bajas son de mayor longitud que los utilizados para medir intensidad a frecuencias altas).

- ✓ Efectuar la medición moviendo la sonda de intensidad continuamente, es decir, haciendo un barrido, a lo largo de las dos trayectorias definidas por la Figura 2.11. Inicialmente, un primer barrido efectuando la trayectoria 1, y después, un segundo barrido efectuando la trayectoria 2, o viceversa.

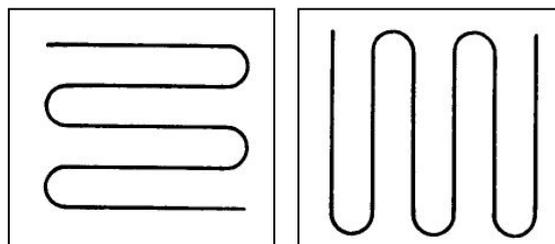


Figura 2.11 – Técnica de barrido mediante una sonda de intensidad.

Durante la operación de barrido, la trayectoria elegida debe ser seguida con precisión, manteniendo el eje de la sonda perpendicular a la superficie de medida en todo momento, procurando que la velocidad de movimiento de la sonda sea uniforme e intentando que la sonda capte los rayos directos provenientes de la dirección de radiación positiva de la fuente sonora (en este caso, del paramento). Generalmente la duración de la medida dependerá de la superficie imaginaria a medir.

- ✓ A fin de poder detectar dispersiones entre las diferentes zonas, subdividir la superficie del cerramiento en otras más pequeñas (tal y como puede verse en la Figura 2.12), pudiendo ser ésta analizada en subáreas de un tamaño menor, dependiendo de la precisión requerida y la problemática de cada zona. Para la medición en los flancos, se opta por realizar escaneos del paramento entero, ya que se busca un índice global. Se recomienda realizar por lo menos 3 medidas con cada espaciador para cada punto y flanco, a fin de minimizar las incertidumbres.

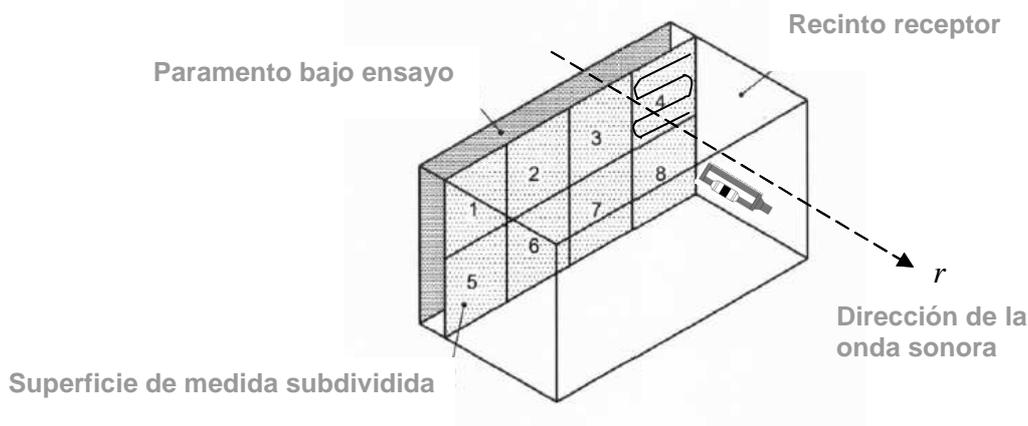


Figura 2.12 – Paramento bajo ensayo subdividido en pequeñas superficies.

- *Medida del nivel de presión sonora en ambos recintos*

El sonómetro analizador permitirá, por un lado, calcular el nivel medio de presión sonora en el recinto emisor, L_1 , del mismo modo que se hacía en el método clásico; y por otro, calcular el nivel medio de presión sonora en el recinto receptor, L_2 , a partir de la intensidad sonora medida con la sonda en el recinto receptor, I_2 .

4. Índices de valoración del aislamiento a ruido aéreo entre locales

El aislamiento medido a través de estas técnicas podrá evaluarse con los mismos índices de valoración que las magnitudes medidas empleando el método clásico, salvo el índice D_{nT} (ya que el tiempo de reverberación del que depende este índice, no es una magnitud medible por la técnica de barrido). Sin embargo, esta circunstancia no impide que el técnico de medidas acústicas, si lo desea, pueda medir T empleando el método clásico, y pueda estimar dicho índice también.

5. Ventajas e inconvenientes del uso de medidas de intensidad en ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales

- *Ventajas*

- ✓ La ventaja fundamental es que se puede medir las vías de propagación.
- ✓ No se requiere de ninguna condición de campo especial en la sala receptora, como sí sucede con las técnicas de presión, las cuales requieren condiciones de campo difuso.

- ✓ Sólo precisa que una de las dos salas sea reverberante, simplificando por tanto el proceso de medición.
- ✓ El ruido de fondo en el recinto receptor no suele presentar problemas, puesto que la relación señal a ruido en este recinto será más alta que en el método clásico, dado que como se ha comentado tras la Figura 2.9, se aumenta la potencia de la fuente emisora.
- *Inconvenientes*
 - ✓ Aparición de valores negativos de intensidad en algunas bandas de frecuencia durante la medida debido a la captación de reflexiones en la dirección contraria a la que viaja la onda sonora de la que nos interesa medir su intensidad.
Para reducir este inconveniente, la solución clásica consiste en cubrir la sala receptora (menos el paramento bajo ensayo) de material absorbente. Sin embargo, una solución alternativa y más práctica, pero igual de eficaz, consiste en colocar una semiesfera absorbente detrás de la sonda.
 - ✓ Los métodos de presión son mucho más sencillos y operativos en su aplicación que los métodos de intensidad, dado que se necesita menos instrumentación acústica.

2.3.3. Medida de aislamiento empleando MLS (Secuencias de Longitud Máxima)

1. Circunstancias que fomentan el uso de secuencias de longitud máxima

La medida de aislamiento a ruido aéreo es, por su naturaleza, una de las medidas acústicas donde más crítico puede resultar conseguir la correcta relación señal-ruido (SNR). Los niveles de ruido de fondo del recinto receptor, junto con el aislamiento de la partición bajo examen, nos van a determinar el nivel al que debemos generar la señal de excitación en el recinto emisor (como sucede con el ruido rosa o blanco). La medida de aislamiento acústico a ruido aéreo con secuencias MLS permiten solucionar estos problemas, tal y como se justificará más adelante.

Las secuencias MLS son secuencias de pulsos con patrón pseudoaleatorio, que se repiten en un periodo $L = 2^n - 1$, donde n es un entero. La Figura 2.13 muestra una secuencia MLS de orden 3. Se trata de una señal determinista, que por tener duración finita, es fácilmente repetible, haciéndola así periódica.

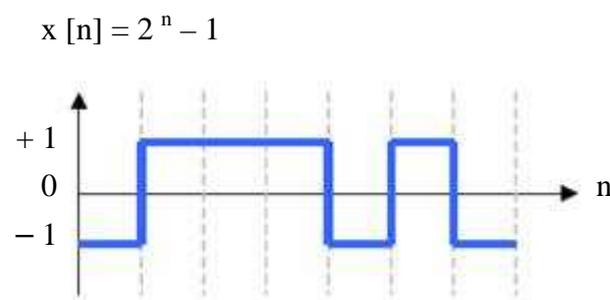


Figura 2.13 – Secuencia MLS de orden 3.

Estas señales de excitación tienen como característica principal que la autocorrelación es aproximadamente una señal delta de Dirac (expresión 2.27). Por lo tanto, teniendo en cuenta la teoría de sistemas lineales e invariantes en el tiempo (sistemas LTI) y las propiedades de la convolución, si se alimenta con esta señal un dispositivo o sistema acústico y se calcula la correlación cruzada entre la salida y la entrada, el resultado es la respuesta al impulso del sistema (igualdad 2.29), lo que nos permite calcular el contenido de frecuencia de manera sencilla, tal y como puede verse en la Figura 2.14.

$$R_{xx}[n] \approx \delta[n] \quad (2.27)$$

$$R_{xy}[n] = R_{xx}[n] * h[n] = \delta[n] * h[n] = h[n] \quad (2.28)$$

$$y[n] = R_{xy}[n] = h[n] \quad (2.29)$$

Posteriormente, realizando la FFT (Fast Fourier Transform) de la respuesta impulsiva, se obtiene el espectro de la señal, que ofrece información del comportamiento energético para cada banda de frecuencia.

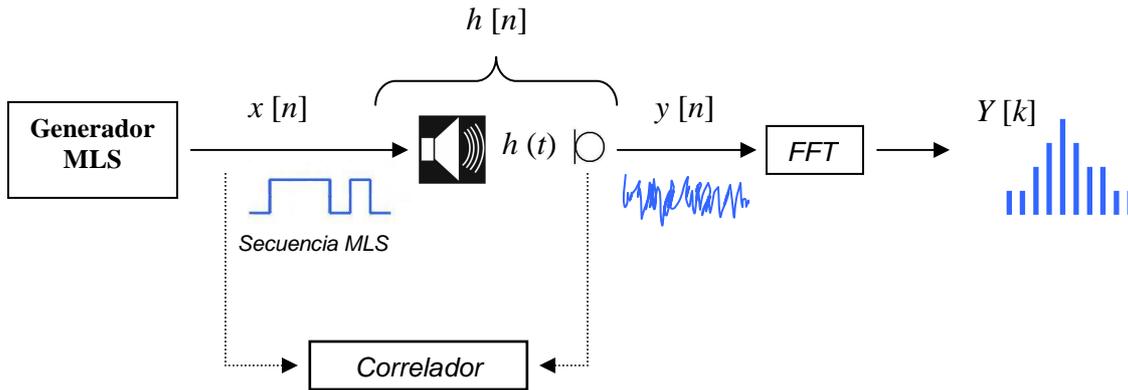


Figura 2.14 – Medida de la respuesta impulsiva de un sistema acústico por el método MLS.

De esta forma, el ruido de fondo presente durante el ensayo podrá estimarse como el promedio de la excitación repetida. Así pues, desaparece el problema del ruido de fondo, puesto que al repetir la medida, como la señal es determinista y el ruido de fondo es aleatorio, al promediar, la potencia del ruido de fondo se reduce.

Esta circunstancia hace que las secuencias MLS resulten ser ideales para realizar medidas de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales, permitiendo obtener índices de valoración mayores en recintos con un nivel de ruido de fondo muy elevado.

2. Generalidades

- *Magnitudes medibles o calculables*
- ✓ Nivel medio de presión sonora en ambos recintos (siendo L_1 [dB] el nivel en el recinto emisor y L_2 [dB] el nivel en el recinto receptor).
- ✓ Tiempo de reverberación en el recinto receptor (T [s]).
- *Método de medida y condiciones que se deben dar para efectuarlo*

De cara a la realización del ensayo, no existe método de medida ni condiciones ideales definidos para el uso de estas secuencias.

- *Equipo necesario para poder llevar a cabo el ensayo*
- ⇒ *Generador de ruido*

Deberá ser capaz de generar secuencias MLS.

⇒ *Analizador sonoro*

Podrá ser cualquiera de los descritos en el “método clásico”, siempre que sea capaz de analizar secuencias MLS.

⇒ *Micrófono de medida, fuente sonora, amplificador de potencia y calibrador acústico*

Tendrán la misma función y características vistas en el “método clásico”.

• *Consideraciones a tener en cuenta en la disposición del ensayo*

Si se desea realizar un ensayo de aislamiento a ruido aéreo entre locales empleando secuencias MLS, los expertos recomiendan que se emplee el mismo procedimiento de medida que en el método clásico, pero generando secuencias MLS en vez de ruido de banda ancha, tal y como se ve en la Figura 2.15.

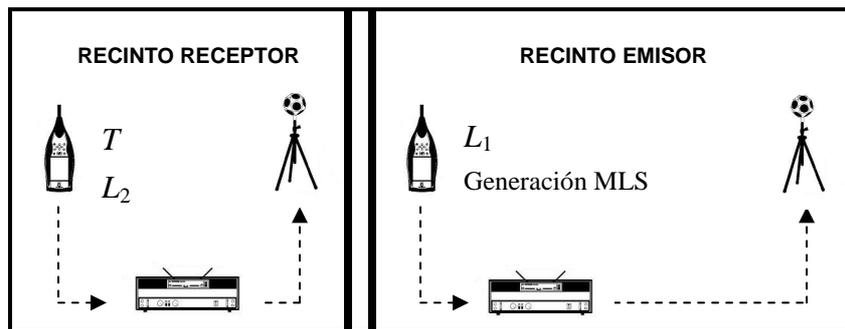


Figura 2.15 – Disposición del ensayo empleando secuencias MLS.



3. Medida de las magnitudes a partir de secuencias MLS

Tanto el nivel de presión sonora en ambos recintos (L_1 y L_2), como el tiempo de reverberación en el recinto receptor (T) se medirán acorde con las directrices del método clásico.

Para obtener el nivel medio de presión sonora en ambos recintos, el analizador calcula la media de la energía de la señal (por banda de frecuencia) obtenida en cada uno de ellos. Por otro lado, para calcular el tiempo de reverberación en el recinto receptor, el analizador memoriza la señal obtenida en el recinto mientras se produce la caída del nivel de señal generado por secuencias MLS. Acto seguido, la divide en señales más pequeñas, a partir de las cuales obtiene los distintos niveles de caída y estima el tiempo de reverberación de la misma forma que en el “método clásico”.

Por lo general, se necesita un promedio de 58 secuencias MLS para conseguir una SNR de 10 [dB] hasta una frecuencia de 3150 [Hz]. Esto implicaría unos 8 minutos de espera hasta generar el campo sonoro deseado. Por lo que, para conseguir una mayor relación señal a ruido, habrá que incrementar el número de secuencias. Por otro lado, dependiendo del rango de frecuencias en el que se vaya a medir, la frecuencia de muestreo y el periodo de la secuencia serán diferentes, tal y como puede verse en la Tabla 2.2.

<i>Frecuencia más alta</i> (f_h [Hz])	<i>Frecuencia de muestreo</i> (f_s [kHz])	<i>Periodo de secuencia</i> (T [s])
$12500 < f_h < 20000$	64	2,048
$6300 < f_h < 10000$	32	4,096
$3150 < f_h < 5000$	16	8,192
$1600 < f_h < 2500$	8	16,384
$800 < f_h < 1250$	4	32,768
$0,1 < f_h < 630$	2	65,536

Tabla 2.2 – Frecuencias de muestreo y períodos de secuencias MLS.

4. Índices de valoración del aislamiento a ruido aéreo entre locales

El aislamiento medido a través de estas técnicas podrá evaluarse con los mismos índices de valoración que las magnitudes medidas empleando el método clásico.

5. Ventajas e inconvenientes del uso de secuencias MLS como señal de excitación

• *Ventajas*

- ✓ El promediado temporal de éstas resulta ser muy eficiente para incrementar la SNR de la medida en la sala receptora, haciéndola más robusta y fiable.
- ✓ Al utilizar la correlación cruzada en el cálculo de la respuesta al impulso, se elimina el ruido de fondo (no correlacionado con MLS) y así la relación señal a ruido se incrementa del orden de 2 a 3 dB cada vez que se dobla el número de promedios, lo que permite efectuar medidas de aislamientos muy elevados con poca potencia de emisión o en entornos muy ruidosos.
- ✓ Ofrecen más posibilidades en condiciones adversas, ya que la medida MLS puede dividirse en dos o más rangos de frecuencia seleccionados para posteriormente combinarse en una sola medida. Este método permite medir correctamente bajo las condiciones de medida más desfavorables, con ruido de fondo y con índices R' muy altos.
- ✓ Presentan un espectro de potencia prácticamente plano.
- ✓ Permiten medir tiempos de reverberación de duración más corta (entre 5 y 10 veces más cortos que empleando el método clásico). La forma de hacerlo es invirtiendo el cálculo por el que el método clásico estima el T . En vez de calcularlo desde la primera muestra en la que cae el nivel de presión sonora en el recinto receptor hasta la última, se hace a la inversa, calculándolo desde la última muestra hasta la primera. A este método se le conoce como "reversed decay mode".
- ✓ La modificación de su contenido espectral nos permite conseguir que la SNR en la sala receptora no varíe mucho entre las diferentes bandas analizadas. Esta característica es interesante de cara a cumplir la SNR deseada en todas ellas con la mínima potencia posible. Además, la señal generada es más potente, y en consecuencia, no necesitar tanta potencia en la sala emisora se puede aprovechar para usar amplificadores más ligeros. En caso de no reducir la potencia de los equipos de medida utilizados, estas técnicas ofrecen la posibilidad de medir aislamientos mucho más elevados, que hasta ahora eran difíciles de medir con fiabilidad mediante los métodos tradicionales. La notable reducción del ruido de fondo de la medida mediante el adecuado procesado de la señal recibida por el micrófono, nos permite trabajar con señales de menos potencia.

• *Inconvenientes*

- ✓ En la utilización de este método se requiere un mayor tiempo de medida para conseguir aumentar la SNR, aunque éste bien podría considerarse un mal menor si se tiene en cuenta que por el método alternativo (ruido rosa o blanco) no hubiera sido posible obtener resultado alguno en circunstancias de pobre SNR.

- ✓ Si la sincronización de la secuencias en recepción no es exacta se pueden producir pérdidas de señal en las bandas de frecuencia más elevadas. Esto puede ocurrir cuando se promedia un número de secuencias muy elevado o cuando el nivel de ruido está muy por encima de la señal útil.
- ✓ Para escenarios en el que el ruido de fondo no es un problema, resulta ser una técnica más complicada que el método clásico y requiere de un equipamiento más sofisticado.

Capítulo 3

ANÁLISIS DE LA NORMA UNE – EN ISO 717 – 1: 1997

3.1. MOTIVACIÓN

Como ya anunciamos en el Capítulo 2, la UNE – EN ISO 717 – 1: 1997 establece un método por el cual la dependencia frecuencial del aislamiento a ruido aéreo se puede convertir en un sólo número que caracteriza el comportamiento acústico global del paramento.

En el momento de su publicación, esta normativa aportó una metodología práctica de trabajo y una facilidad en el manejo de documentación, puesto que reduce la cantidad de información a manejar en los cálculos. Sin embargo, en el presente, dado que normalmente se trabaja mediante plataformas informáticas, es perfectamente posible utilizar la información de la medida en frecuencia, sin necesidad de aproximar el espectro de aislamiento medido por medio de curva de referencia alguna.

Teniendo en cuenta lo que presupone la norma y en vista del procedimiento a seguir para el cálculo de dicho aislamiento, cabe plantearse tres posibles problemas derivados de su uso:

1. Distintos espectros medidos pueden dar lugar al mismo valor de aislamiento global.
2. El valor de $D_{nT,w}$ se corresponde con el valor de D_{nT} a 500 Hz de la curva de referencia. Cuando el espectro medido, tiene exactamente la misma forma que la curva de referencia, el valor de $D_{nT,w} = D_{nT\ cr}(500\text{ Hz}) = D_{nT\ em}(500\text{ Hz}) + 2\text{ dB}$, donde los subíndices “cr” y “em” hacen mención a la curva de referencia y al espectro medido. Este hecho, al menos, resulta paradójico.
3. Surge una pérdida de información irreversible por el hecho de aproximar el aislamiento global de un paramento a la curva que se facilita en la norma.

3.2. ANÁLISIS EN RELACIÓN A LA OBTENCIÓN DEL MISMO VALOR DE AISLAMIENTO GLOBAL PARA DISTINTOS ESPECTROS

Para analizar este primer problema, se han buscado diferentes espectros de medida que permitan obtener el mismo valor de aislamiento a 500 Hz (es decir, el mismo valor de $D_{nT,w}$). De esta manera, se intentará demostrar que numerosos espectros, indistintamente de la forma que posean, permiten, efectuando el “método de comparación” de la norma, obtener el mismo valor de aislamiento global a ruido aéreo entre locales de un paramento.

Para ello, se efectuará el “método de comparación” primeramente entre la curva de referencia y dos espectros parecidos entre sí, y posteriormente, entre la curva de referencia y tres espectros que entre ellos son totalmente dispares.

3.2.1. Con espectros distintos que poseen una forma parecida

- Supongamos un *primer espectro*, como el de la Figura A1.1 del Anexo 1, cuyos valores de aislamiento medidos se muestran en la Tabla A1.1.

Si efectuamos el “método de comparación” entre este espectro y la curva de referencia, obtenemos lo siguiente:

- ✓ Σ Desviaciones desfavorables = 32 dB.
- ✓ Valor de aislamiento a 500 Hz = 54 dB.

- Fijémonos ahora en un *segundo espectro*, como el de la Figura A1.2, con los valores de aislamiento que se muestran en la Tabla A1.2.

Efectuando el “método de comparación” entre dicho espectro y la curva de referencia, se obtiene que:

- ✓ Σ Desviaciones desfavorables = 32 dB.
- ✓ Valor de aislamiento a 500 Hz = 54 dB.

3.2.2. Con espectros distintos que poseen una forma muy dispar

- Supongamos un *tercer espectro*, como el de la Figura A1.3 y cuyos valores de aislamiento medidos son los que aparecen en la Tabla A1.3.

Si efectuamos el método de la norma entre el espectro y la curva de referencia, obtenemos lo siguiente:

- ✓ Σ Desviaciones desfavorables = 32 dB.
- ✓ Valor de aislamiento a 500 Hz = 54 dB.

- Centremos nuestra atención en un *cuarto espectro*, como el de la Figura A1.4, con los valores de aislamiento que se muestran en la Tabla A1.4.

Si se realiza el “método de comparación” entre este espectro y la curva proporcionada por la norma, obtenemos que:

- ✓ Σ Desviaciones desfavorables = 26 dB.
- ✓ Valor de aislamiento a 500 Hz = 54 dB.

- Por último, fijémonos en un *quinto espectro* como el de la Figura A1.5, cuyos valores de aislamiento vienen dados por la Tabla A1.5.

Si nuevamente se efectúa la comparación entre el espectro y la curva de referencia, se obtiene para esta ocasión lo siguiente:

- ✓ Σ Desviaciones desfavorables = 30 dB.
- ✓ Valor de aislamiento a 500 Hz = 54 dB.

3.2.3. Conclusiones

1. El cálculo del valor de aislamiento global de un paramento a ruido aéreo por el “método de comparación” es un procedimiento no unívoco, puesto que diferentes curvas de medida pueden dar como resultado el mismo valor de $D_{nT,w}$.
2. Se trata de una operación no reversible, debido a que en el momento que queremos conocer la curva de medida, no podemos deshacer el procedimiento para obtenerla, ya que el espectro de partida podría ser cualquiera de los 5 estudiados (dado que todos ofrecen un $D_{nT,w} = 54$ dB).

3.3. ANÁLISIS DE LAS PARTICULARIDADES QUE SE PRESENTAN AL EFECTUAR EL MÉTODO DE COMPARACIÓN AFECTANDO AL VALOR DE AISLAMIENTO

Supongamos un espectro como el de la Figura A1.3 con los valores de aislamiento medidos que se muestran en la Tabla A1.3.

Como ya hemos visto en el problema anterior, si efectuamos el “método de comparación” entre la curva de medida y la curva de referencia (las cuales tienen idéntica forma), obtenemos los siguientes resultados:

- ✓ Σ Desviaciones desfavorables = 32 dB.

- ✓ Valor de aislamiento a 500 Hz = 54 dB.

La lógica nos diría que el valor de aislamiento debiera haber sido 52 dB, ya que si el espectro medido tiene idéntica forma que la curva de referencia, ésta no tendría porqué desplazarse hacia la curva de medida, puesto que ya coincide con ella. Además, teniendo en cuenta que esta norma parte de la base de que cualquier aislamiento de un paramento debe aproximarse al espectro de referencia, podemos preguntarnos: ¿entonces, porque es necesario desplazar la curva?...

Sin embargo, puesto que hay que trabajar de acuerdo a la normativa, debemos efectuar el procedimiento de ajuste tal y como se describe en la misma. De manera que, efectuando la comparación de ambas curvas, obtenemos un valor de aislamiento a 500 Hz igual a 54 dB.

Si analizamos detenidamente lo que indica la UNE – EN ISO 717 – 1: 1997 con respecto al “método de comparación”, en la norma se expone que:

1. “... se desplaza la curva de referencia en saltos de 1 dB hacia la curva de medida hasta que la suma de desviaciones desfavorables sea lo mayor posible pero no mayor que 32 dB...”
2. “Se produce una desviación desfavorable en una determinada frecuencia cuando el resultado de las mediciones es inferior al valor de referencia. Sólo deben considerarse las desviaciones desfavorables”

En estas dos expresiones queda patente el problema del que estamos hablando, que se ve reflejado en los resultados. Obtener un valor de aislamiento global igual a 54 dB es un fenómeno algo paradójico, puesto que no existen desviaciones (ni favorables ni desfavorables), ya que las dos curvas son idénticas. Por lo tanto, no debería efectuarse desplazamiento alguno, acorde con la 2ª expresión. Sin embargo, por otro lado, la norma nos dice que para efectuar el método, es necesario obtener la mayor suma de desviaciones desfavorables hasta un máximo permitido, por lo que en concordancia con la 1ª expresión, resulta ser obligatorio el desplazar la curva de referencia hasta llegar a él. Esta última circunstancia provoca que para obtener el mayor número de desviaciones desfavorables haya que desplazar la curva de referencia lo que sea necesario, y en consecuencia, se obtenga un valor de aislamiento $D_{nT,w} = 54$ dB.

3.4. ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE INFORMACIÓN IRREVERSIBLE ASOCIADA A LA CURVA EMPLEADA EN EL MÉTODO DE COMPARACIÓN

Para intentar analizar este problema, se ha desarrollado una nueva aplicación que trata de cuantificar la pérdida de información que se obtiene por el hecho de aproximar el aislamiento global de una solución constructiva a la curva que se facilita en la norma. A continuación explicamos paso a paso el *procedimiento general* para llevar a cabo esa cuantificación:

1. Generamos un espectro de medida cualquiera.
2. Realizamos el “método de comparación” entre la curva de referencia y la curva de medida, obteniendo el valor global de aislamiento ($D_{nT,w}$). A este valor, le denominaremos objetivo y lo definiremos como $D_{nT,w \text{ obj}}$.
3. En este tercer paso, vamos a beneficiarnos de la definición de varianza para abordar nuestro problema. Dicho estadístico nos va a servir para crear 100000 espectros a partir de la curva de medida.

Como ya sabemos de teoría de probabilidad, la varianza es un parámetro que nos informa de la dispersión de una variable aleatoria. Concretamente muestra la variabilidad de una distribución (Figura 3.1) indicando, por medio de un número, si las diferentes medidas de una variable están muy alejadas de la media. Cuanto mayor sea ese valor, mayor será la variabilidad.

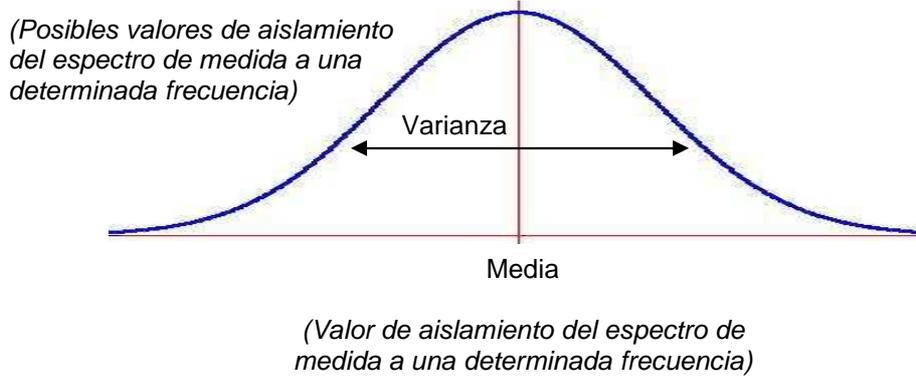


Figura 3.1 – Distribución normal.

Nuestra intención es generar 100000 curvas de medida distintas, que permitan obtener el mismo valor de aislamiento global. Para ello, aplicaremos una distribución normal al valor de aislamiento de cada una de las frecuencias centrales (Figura 3.2), obteniendo así 100000 valores aleatorios para cada una de ellas, y en consecuencia, 100000 espectros diferentes para compararlos con la curva de referencia. El valor de varianza aplicado a cada una de las distribuciones normales será el mismo para todas frecuencias centrales.

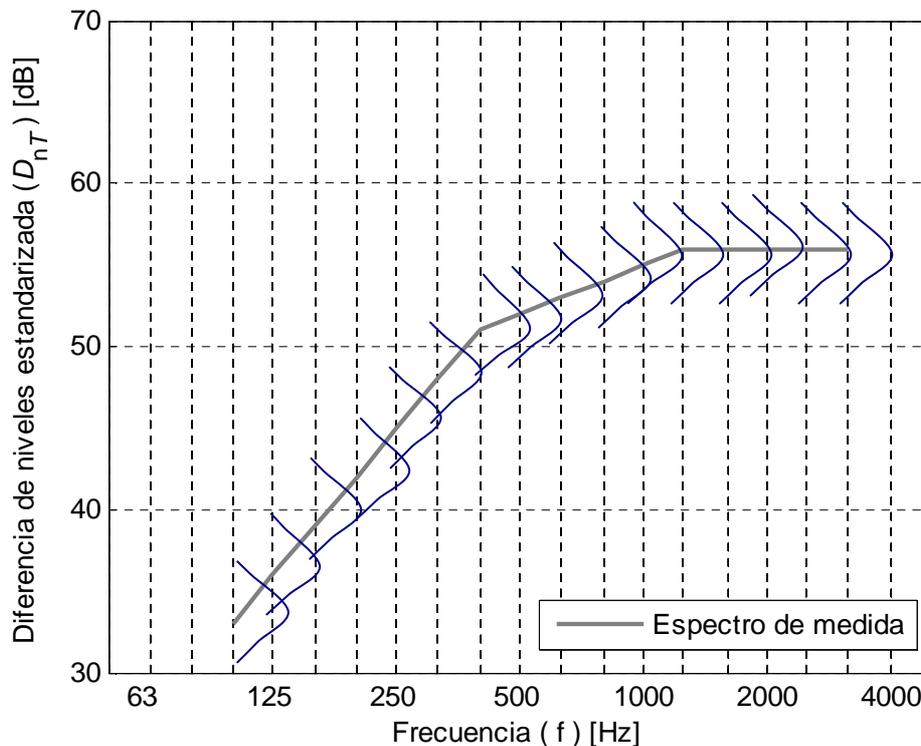


Figura 3.2 – Distribuciones normales entorno a cada valor de aislamiento para cada frecuencia central.

De esta forma, para cada valor de aislamiento que depende de la frecuencia, $D_{nT}(f)$, generamos una distribución cuya media será un determinado valor, $D_{nTm}(f)$, al que asociaremos una determinada varianza (la misma para todas las frecuencias), mediante la que se obtendrán diferentes espectros entorno al formado por los 16 valores de $D_{nTm}(f)$. Seguidamente, realizamos el “método de comparación” entre la curva de referencia y cada uno de ellos, obteniendo así el valor global de aislamiento (al que denominaremos como $D_{nT,w}$) para cada espectro. En total obtendremos 100000 valores de $D_{nT,w}$, uno por cada espectro generado.

4. Es necesario establecer un intervalo de confianza que garantice que en efecto, las 100000 curvas de medida generadas permiten obtener el mismo valor de aislamiento global que el de la curva de medida original, para así poder determinar el abanico de espectros que darían lugar al mismo $D_{nT,w}$. De esta forma, se cuantifica, en términos de varianza, la pérdida de información que ocasiona el método de comparación.

Para ello, lo que hacemos en este cuarto punto es incrementar la varianza hasta que el valor global de aislamiento de 5000 espectros de los 100000 generados (un 5 %) sea distinto al valor objetivo. Por lo tanto, podremos incrementar la varianza aplicada hasta que se garantice que al menos obtenemos un 95 % de aciertos.

(Es importante destacar, que en la práctica, los pasos 3 y 4 van unidos. Por lo tanto, ambos se realizan a la vez y se identifican como “3” en todas las pruebas desarrolladas en el capítulo para analizar el problema)

3.4.1. Primera prueba

Supongamos como espectro de partida el de la Figura A1.3, cuyos valores de aislamiento medidos son los de la Tabla A1.3. Estableciendo esta situación, vamos a iniciar el procedimiento general anteriormente descrito, paso a paso:

1. Generamos un espectro de medida cualquiera (para este ejemplo, el de la Figura A1.3). Los valores de este espectro se corresponden con $D_{nT_m}(f)$.
2. Realizamos el “método de comparación”, donde obtenemos que el $D_{nT,w \text{ obj}}$ es igual a 54 dB.
3. Si incrementamos la varianza poco a poco desde su valor inicial (0) hasta el valor que garantice que ya es imposible conseguir el porcentaje buscado, obtendremos que el máximo valor permitido es igual a $1,7 \cdot 10^{-30}$. Con él se alcanza un 95,043 % de aciertos.

En vista de los resultados, podemos observar que el máximo valor de varianza que nos permite obtener el porcentaje buscado es extremadamente pequeño. Esta circunstancia tiene su razón de ser en lo que vamos a explicar a continuación:

- ✓ El generar un espectro idéntico al de la curva de referencia y aplicar el “método de comparación” supone que nos encontremos en la situación que se describe en la Figura A1.3, donde se obtienen los siguientes resultados:

Σ Desviaciones desfavorables = 32 dB.

Valor de aislamiento a 500 Hz = 54 dB.

- ✓ Como podemos observar, este espectro de medida es con el que se consigue obtener el mayor número de desviaciones desfavorables, acorde con lo que dicta la norma, es decir, 32. Modificar ligeramente el valor de aislamiento a cualquier frecuencia, haría que la suma de desviaciones desfavorables fuera mayor de 32 dB. He aquí el motivo por el cual el valor de la varianza resulta ser tan pequeño, puesto que si fuera mayor, ya no sería posible alcanzar el 95 % de aciertos.

Sin embargo, lo que acabamos de comprobar está relacionado tanto con la suma de desviaciones desfavorables como con la forma del espectro de medida. Otras medidas cuyo espectro tuviera igual forma pero distintos valores de aislamiento, daría lugar a otros valores de varianza. Para obtener conclusiones sobre este planteamiento, crearemos distintos espectros entorno al espectro formado por los 16 valores de $D_{nT_m}(f)$, aplicando desplazamientos en incrementos de 0,1 dB sobre éste último, repitiendo el mismo procedimiento.

De este modo, si realizamos el procedimiento general sobre las distintas curvas de medida que derivan del Espectro 3, desplazándolo en pasos de 0,1 dB obtenemos los resultados que se muestran en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.3.

<u>Nº DE PRUEBA</u>	<u>DESPLAZAMIENTO</u>	<u>Σ DESVIACIONES DESFAVORABLES</u>	<u>VARIANZA</u>	<u>ACIERTOS</u>
1	0,1	30,4	0,055	95,576 %
2	0,2	28,8	0,23	95,235 %
3	0,3	27,2	0,52	95,067 %
4	0,4	25,6	0,85	95,151 %
5	0,5	24	1	95,301 %
6	0,6	22,4	0,89	95,01 %
7	0,7	20,8	0,52	95,288 %
8	0,8	19,2	0,23	95,231 %
9	0,9	17,6	0,058	95,126 %
10	1	16	0	0 %

Tabla 3.1 – Resultados del procedimiento general para desplazamientos del Espectro 3.

Podemos observar que se obtiene el mismo valor de $D_{nT,w}$ aplicando desplazamientos $\leq 0,9$ dB en pasos de 0,1 dB. Desplazamientos mayores no permiten obtener el porcentaje de aciertos deseado puesto que supone establecer como objetivo el valor de 55 dB.

Es importante destacar que se produce una situación simétrica entre desplazamientos, cuyo eje de simetría es el de 0,5 dB tal y como se ve en la Figura 3.3.

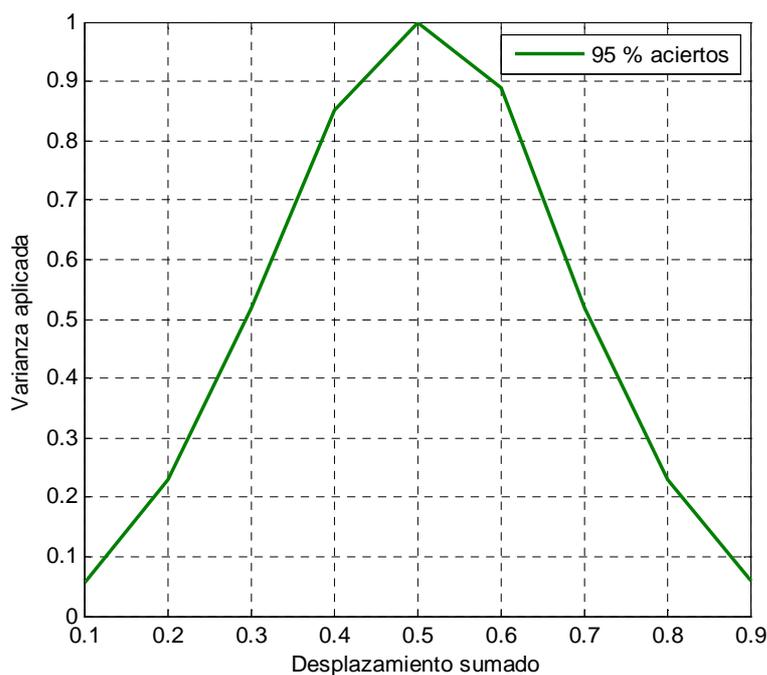


Figura 3.3 – Dependencia entre el desplazamiento del Espectro 3 y la varianza.

El motivo por el cual el eje de simetría se da en ese desplazamiento puede explicarse a través de la Figura A1.3. En esta situación, la suma de desviaciones desfavorables es 32 dB.

Si efectuamos desplazamientos de 0,1 dB es posible obtener hasta 10 espectros (el original y 9 desplazamientos) que pueden dar como resultado el mismo valor de aislamiento global. Si realizamos un desplazamiento de 0,5 dB sobre el Espectro 3, la suma de desviaciones desfavorables será igual a 24 dB, quedando por consiguiente la misma suma de desviaciones desfavorables por encima que por debajo del espectro desplazado con respecto a los límites

superior e inferior que cambian el $D_{nT,w\text{ obj}}$ (siendo 32 el límite inferior y 16 el límite superior). Se obtiene entonces una suma de 8 desviaciones desfavorables por debajo del espectro desplazado y una suma de 8 desviaciones desfavorables por encima, permitiendo así un mayor valor de varianza (tal y como se puede observar en la Figura 3.4, que es un zoom de la Figura A1.3 que muestra esta situación).

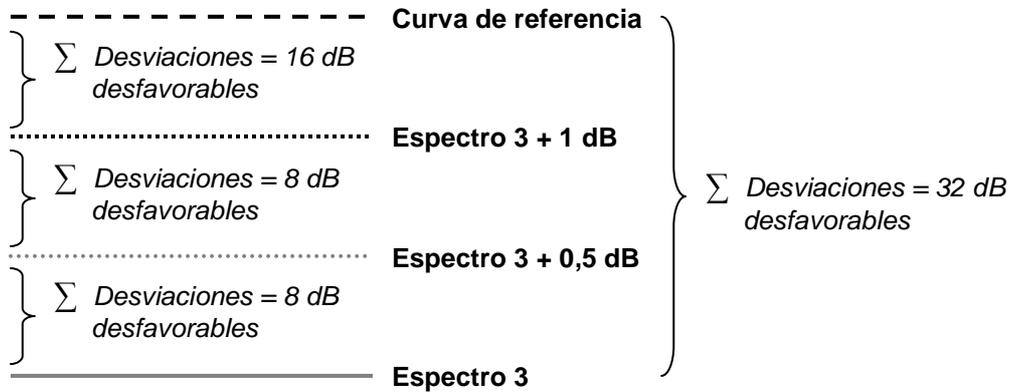


Figura 3.4 – Situación que se presenta para los desplazamientos del Espectro 3.

Se trata del espectro que mejor se ajusta, puesto que otros valores de desplazamiento dan lugar a sumas de desviaciones desfavorables más próximas a 32 o a 16, permitiendo una menor varianza (ver Tabla 3.1).

Como es obvio, este comportamiento simétrico de la Figura 3.3 se produce de forma idéntica para desplazamientos ≥ 1 dB. Los máximos valores de varianza resultan ser similares al efectuar los mismos desplazamientos, tal y como se aprecia en la Figura 3.5.

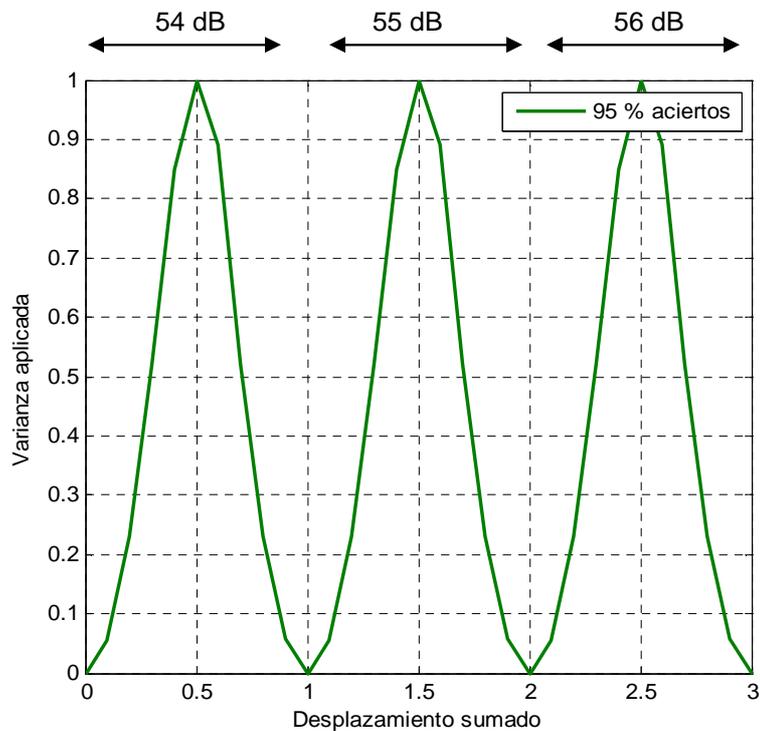


Figura 3.5 – Comportamiento periódico entre el desplazamiento del Espectro 3 y la varianza para distintos valores objetivos.

3.4.2. Segunda prueba

Supongamos como espectro de partida el de la Figura A1.6, cuyos valores de aislamiento medidos son los de la Tabla A1.6. Estableciendo esta situación de partida, vamos a efectuar el procedimiento general de la misma forma que lo hemos hecho en la prueba anterior, intentando obtener los diferentes espectros que pueden dar lugar al mismo valor de aislamiento global.

<u>Nº DE PRUEBA</u>	<u>DESPLAZAMIENTO</u>	<u>Σ DESVIACIONES DESFAVORABLES</u>	<u>VARIANZA</u>	<u>ACIERTOS</u>
1	0	31,4	0,014	95,482 %
2	0,1	30,5	0,09	95,168 %
3	0,2	29,6	0,225	95,072 %
4	0,3	28,7	0,412	95,01 %
5	0,4	27,8	0,572	95,06 %
6	0,5	26,9	0,598	95,067 %
7	0,6	26	0,426	95,107 %
8	0,7	25,2	0,202	95,005 %
9	0,8	24,4	0,061	95,092 %
10	0,9	23,6	0,0037	95,065 %
11	1	22,8	0	0 %

Tabla 3.2 – Resultados del procedimiento general para desplazamientos del Espectro 6.

Tal y como muestran los resultados de la Tabla 3.2 y se ve en la Figura 3.6, de nuevo se produce un comportamiento con una cierta simetría entre los desplazamientos donde el máximo valor de varianza se produce para el desplazamiento de 0,5 dB por las mismas circunstancias que explicábamos en la primera prueba (aunque para valores y límites distintos).

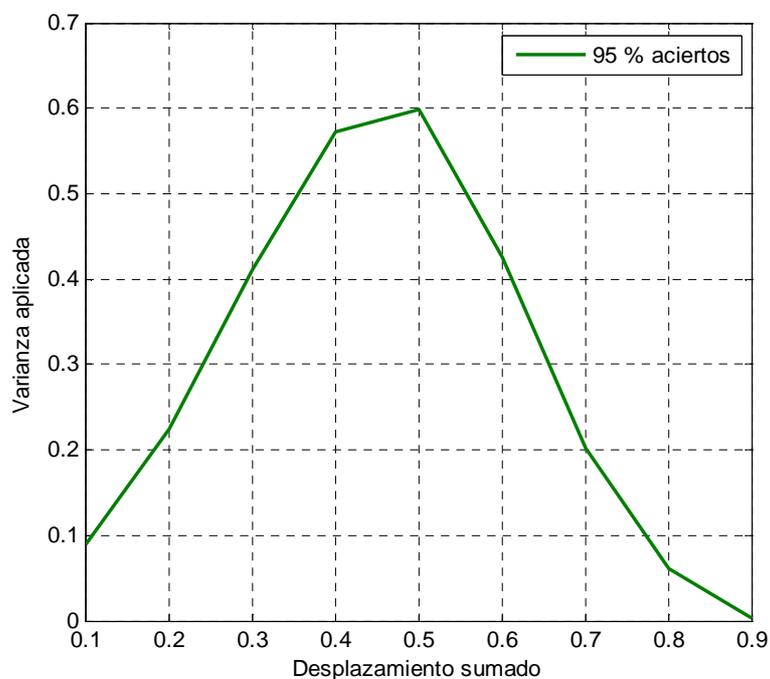


Figura 3.6 – Dependencia entre el desplazamiento del Espectro 6 y la varianza.

Como es lógico, este espectro también presenta un comportamiento periódico en función de los desplazamientos, aunque esta vez, omitimos su representación.

3.4.3. Tercera prueba

Por último, supongamos como espectro de partida el de la Figura A1.7, cuyos valores de aislamiento medidos son los de la Tabla A1.7. Para esta situación de partida y efectuando el procedimiento general como en pruebas anteriores, obtendremos los resultados de la Tabla 3.3 que se ilustran en la Figura 3.7.

<u>Nº DE PRUEBA</u>	<u>DESPLAZAMIENTO</u>	<u>Σ DESVIACIONES DESFAVORABLES</u>	<u>VARIANZA</u>	<u>ACIERTOS</u>
1	0	32	$6,9 \cdot 10^{-30}$	95,042 %
2	0,1	31,5	0,0184	95,01 %
3	0,2	31	0,072	95,13 %
4	0,3	30,5	0,157	95,024 %
5	0,4	30	0,259	95,01 %
6	0,5	29,6	0,315	95,09 %
7	0,6	29,2	0,28	95,064 %
8	0,7	28,8	0,174	95,005 %
9	0,8	28,4	0,073	95,172 %
10	0,9	28	0,0184	95,003 %
11	1	27,6	0	0 %

Tabla 3.3– Resultados del procedimiento general para varios desplazamientos del Espectro 7.

Nuevamente, aparece un comportamiento simétrico de los desplazamientos, tal y como se aprecia en la Figura 3.7 y una tendencia periódica en función de ellos, que de nuevo, no se representa.

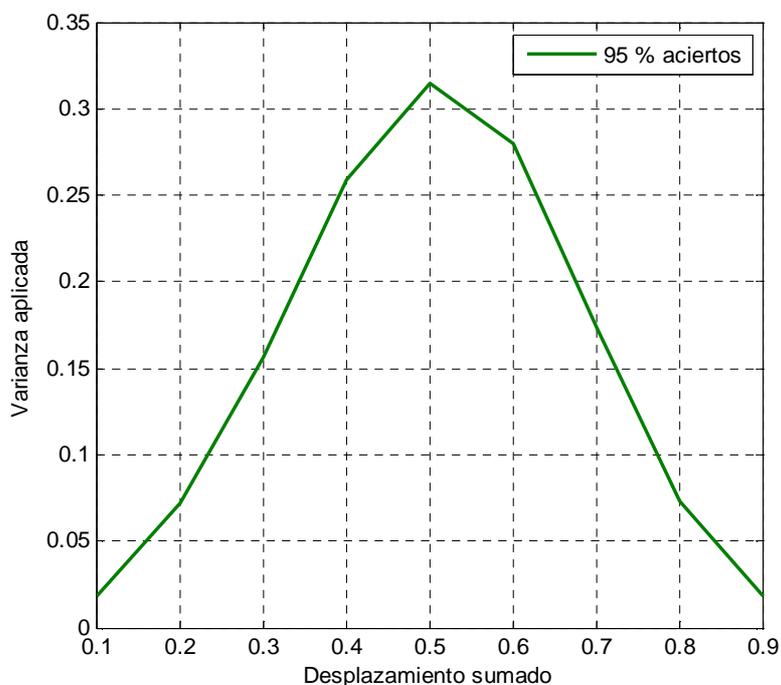


Figura 3.7– Dependencia entre el desplazamiento del Espectro 7 y la varianza.

3.4.4. Conclusiones

1. El cálculo del $D_{nT,w}$ por medio del “método de comparación” lleva asociado una pérdida de información intrínseca al propio procedimiento, puesto que el ajuste de la curva de referencia debe efectuarse en desplazamientos de 1 dB.
2. Existe una cierta simetría de la dependencia entre valores máximos de varianza y posibles desplazamientos de un espectro de medida que garantizan alcanzar el objetivo. Tal y como observamos en las pruebas, el máximo valor de varianza posible coincide con el desplazamiento que hace de eje de simetría (el de 0,5 dB).

La uniformidad de la gráfica en forma de campana de Gauss que muestra esa dependencia se encuentra relacionada con el número de desviaciones desfavorables para cada desplazamiento. Por este motivo, de las 3 pruebas anteriores, las campanas menos perfectas son las que representan a los Espectros 6 y 7. El motivo por el cual sucede este fenómeno se debe a que cuando se efectúa un desplazamiento de 0,5 dB sobre cada uno de ellos, se obtiene una suma de desviaciones desfavorables igual a 26,9 dB y 29,6 dB respectivamente; no pudiendo quedar la misma suma de desviaciones por encima que por debajo del espectro desplazado con respecto a los límites superior e inferior que cambian el $D_{nT,w \text{ obj}}$, como sí sucede con el Espectro 3 (donde queda una suma de 8 tanto por encima como por debajo, tal y como se ha visto anteriormente).

Para el Espectro 6 la suma de desviaciones desfavorables con respecto al límite inferior de desplazamiento es de 4,5 dB y con respecto al límite superior asciende a 4,1 dB. Sin embargo, para el Espectro 7, la suma de desviaciones desfavorables con respecto al límite inferior es tan sólo de 2,4 dB y con respecto al límite superior de 2 dB.

3. El máximo valor de varianza obtenido depende del desplazamiento y del espectro de medida.

Como hemos visto a lo largo de todo el capítulo, antes de efectuar el método de comparación, diferentes valores de aislamiento en frecuencia de la curva de medida se encuentran por encima o por debajo de la curva de referencia. Esta circunstancia condiciona los valores de varianza a aplicar.

El máximo valor de varianza aplicado, y en consecuencia, el valor más alto de la gráfica con forma de campana de Gauss obtenida, depende de los valores de aislamiento en frecuencia que forman parte de la suma de desviaciones no desfavorables. Es decir, del número de valores de aislamiento medidos que se encuentran por encima de la curva de referencia.

Si analizamos las curvas de medida estudiadas, podemos observar que cuando efectuamos un desplazamiento de 0,5 dB sobre el Espectro 3 y aplicamos el método de comparación, ningún valor del espectro medido queda por encima de la curva de referencia, lo cual nos permite aplicar una varianza igual a 1. Si aplicamos ese mismo desplazamiento y observamos los otros dos espectros, obtenemos que para el Espectro 6 son siete los valores de aislamiento en frecuencia que se encuentran por encima de la curva de referencia, lo que nos permite establecer una varianza igual a 0,598. Del mismo modo, para el Espectro 7 son once los valores que se encuentran por encima, permitiendo fijar una varianza igual a 0,315.

Por lo tanto, podemos afirmar que cuanto menor es el número de valores de aislamiento en frecuencia del espectro medido que se encuentran por encima de la curva de referencia antes de efectuar el método de comparación, mayor es el valor de varianza aceptado.

4. Intentar reducir las posibles deficiencias que pudieran generarse durante el proceso de medida in situ, se ve descompensado por el tipo de ajuste generalista del método desarrollado en la norma para calcular el $D_{nT,w}$.

A lo largo de todo el capítulo, hemos visto que numerosos espectros pueden dar como resultado el mismo valor de aislamiento global. Esta circunstancia puede relacionarse con la incertidumbre de medida.

A pesar de que el personal humano a cargo de hacer la medida se esfuerce en conseguir que las condiciones del campo difuso sean perfectas, respete escrupulosamente las distancias para efectuar los diferentes registros de nivel de presión sonora, mida el tiempo de reverberación correctamente, o utilice una instrumentación perfecta... el tipo de ajuste que hace el método de la norma UNE – EN ISO 717 – 1: 1997, introduce una incertidumbre adicional y una pérdida de información. Por lo tanto, ha de tenerse en cuenta.

5. Por todo lo visto y concluido en este capítulo, podemos afirmar que existe una clara pérdida de información a la hora de calcular el valor de aislamiento global a ruido aéreo de un paramento mediante el empleo de este método.
En consecuencia, podría resultar necesario efectuar distintos procedimientos de cálculo estadístico para estimar la incertidumbre de medida que conlleva la utilización de la norma UNE – EN ISO 717 – 1: 1997, de cara a la redacción y presentación de informes de ensayo.
6. Sería posible realizar todo el estudio anterior estableciendo distintos valores de varianza para cada una de las 16 frecuencias, en vez de aplicar el mismo valor para todas ellas.
Este análisis representa una situación más realista desde el punto de vista acústico, puesto que, generalmente, al repetir una medición, se observa una mayor dispersión en los valores de aislamiento para bajas frecuencias, que para el caso de frecuencias medias, en donde los valores son menores, o para altas frecuencias, en donde la variación de valores es intermedia. Por esta razón, tiene sentido repetir el análisis aquí presentado, utilizando valores de varianza cuya distribución sea similar a la indicada.

Por cuestiones de tiempo, se ha decidido no enfocar el estudio de esta otra forma, dejando así una vía abierta a futuros desarrollos, que puedan establecer como punto de partida a su análisis todas las ideas planteadas aquí.

Capítulo 4

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

4.1. INTRODUCCIÓN

A la hora de expresar el resultado de la medición de una magnitud física, es obligado dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado, de forma que quienes lo utilicen puedan evaluar su idoneidad. Sin esta indicación, las mediciones no pueden compararse entre sí ni con otros valores de referencia dados en especificaciones o normas. Por ello, es necesario establecer un procedimiento fácilmente comprensible y aceptado universalmente que caracterice la calidad del resultado.

A partir de aquí, nace el concepto conocido como *incertidumbre de medida*, parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando (magnitud particular objeto de medición).

En medidas acústicas, en general, la estimación de la incertidumbre de medida es algo que no se venía haciendo anteriormente por parte de empresas y laboratorios de ensayo, ni que formaba parte de los planes de estudio universitarios. Sin embargo, gracias a la implantación de sistemas de calidad, cada vez más, los laboratorios y empresas deben estimar la incertidumbre de medida de sus ensayos.

Para evaluar y expresar la incertidumbre de medida, se publicó en 1995 la “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*” (GUM), guía de referencia que proporciona reglas generales y procedimientos adecuados para la estimación de la incertidumbre.

Existen numerosas fuentes posibles de incertidumbre en una medición, tales como valores de referencia inexactos, resolución finita del instrumento de medida, lectura sesgada de instrumentos o aproximaciones e hipótesis establecidas o definición imperfecta del mensurando, entre otras.

4.2. PROCEDIMIENTO BÁSICO PARA DETERMINAR LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

4.2.1. Prefacio

La GUM establece un método para estimar la incertidumbre de medida denominado “método de propagación de incertidumbre”, el cual es aplicable a modelos como el de la expresión 4.1, que generalmente son lineales.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (4.1)$$

donde Y es el mensurando o magnitud de salida que depende de una serie de magnitudes de entrada X_i ($i = 1, \dots, N$) de acuerdo con una relación funcional f .

La relación funcional representa el procedimiento de medición y el método de evaluación. Describe cómo se obtienen los valores de la magnitud de salida a partir de los valores de las magnitudes de entrada, las cuales a su vez pueden ser consideradas como mensurandos, pudiendo depender de otras magnitudes y llegándose así a una relación funcional más compleja.

Todas las magnitudes involucradas se tratan como variables aleatorias (puesto que son variables que pueden tomar cualquier valor y se les asocia una distribución de probabilidad), de manera que tanto las magnitudes de entrada como la de salida serán consideradas también como variables aleatorias.

Las componentes de incertidumbre asociadas a las magnitudes de entrada se pueden agrupar en dos categorías según su método de evaluación, "A" y "B". Al tratarse de variables aleatorias, los dos tipos de evaluación se basan en distribuciones de probabilidad y ambas se cuantifican mediante varianzas o desviaciones típicas. La varianza estimada que caracteriza a una componente de la incertidumbre obtenida mediante una evaluación de Tipo "A" se calcula a partir de una serie de observaciones repetidas (por ejemplo, diferentes medidas). Sin embargo, para una componente de incertidumbre obtenida a partir de una evaluación de Tipo "B", la varianza se evalúa a partir de otros conocimientos (experiencia, especificaciones, resultados anteriores...). De cara a su evaluación, existen 3 tipos de incertidumbre de medida que podemos estimar:

✓ *Incertidumbre típica:*

Incertidumbre del resultado de una medición, expresada en forma de desviación típica y representada con la letra minúscula "u".

✓ *Incertidumbre típica combinada:*

Incertidumbre típica del resultado de una medición, cuando el resultado se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes y que se define como "u_c".

✓ *Incertidumbre expandida:*

Magnitud que define un intervalo de confianza entorno al resultado de una medición y en el que se espera encontrar una fracción importante de la distribución de valores que podrían ser atribuidos razonablemente al mensurando. Se expresa con la letra mayúscula "U".

4.2.2. Evaluación de la incertidumbre típica

- Tipo "A"

Se habla de una componente Tipo "A", cuando la *incertidumbre típica* de una magnitud de entrada X_i , $u(x_i)$, obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

Si X_i se determina mediante n mediciones independientes, resultando en valores q_1, q_2, \dots, q_n , el mejor valor estimado x_i para el valor de X_i es la media aritmética de los resultados individuales, tal y como figura en la expresión 4.2.

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n q_j \quad (4.2)$$

Si la dispersión de los valores observados se expresa por su desviación típica experimental, dada por la igualdad 4.3.

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (4.3)$$

entonces la *incertidumbre típica* de X_i , $u(x_i)$, se obtiene mediante el cálculo de la desviación típica experimental de la media aritmética (ecuación 4.4).

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (4.4)$$

- Tipo "B"

Se habla de una componente Tipo "B", cuando la *incertidumbre típica* de X_i , $u(x_i)$, se evalúa aplicando un juicio científico basado en toda la información disponible sobre la posible variabilidad de X_i y se obtiene de distinta manera dependiendo de la fuente que la genera.

La cuantificación de la fuente de incertidumbre incluye la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere este valor. Las distribuciones que aparecen más frecuentemente son la normal, la rectangular y la triangular. Por lo tanto, antes de comparar y combinar contribuciones de la incertidumbre que tienen distribuciones diferentes, es necesario representar los valores de las incertidumbres originales como incertidumbres típicas de la manera que se detalla a continuación, determinándose antes la desviación típica de la distribución asignada a cada fuente.

1. Distribución normal

La desviación típica experimental de la media calculada a partir de los resultados de una medición repetida según la ecuación 4.4. ya representa la incertidumbre típica.

Cuando se dispone de valores de una incertidumbre expandida U , como por ejemplo los presentados en certificados de calibración, se divide U entre el factor de cobertura k (factor numérico multiplicador, el cual se explicará detalladamente en el apartado 4.2.4), obteniéndose la *incertidumbre típica* de la expresión 4.5.

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad (4.5)$$

2. Distribución rectangular o uniforme

Si la magnitud de entrada X_i tiene una distribución rectangular con el límite superior a_+ y el límite inferior a_- , el valor estimado x_i será la esperanza o media y vendrá dado por la ecuación 4.6.

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad (4.6)$$

donde la incertidumbre típica podrá ser calculada por la expresión 4.7.

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} \quad (4.7)$$

Si los límites superior e inferior son simétricos con respecto a x_i , $a_+ - a_- = 2a$ y $u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$.

Las aplicaciones típicas tratadas con esta distribución son la resolución de un instrumento digital o la incertidumbre relacionada con el número de cifras significativas de datos tomados de la literatura, donde a corresponde al último dígito significativo o la última cifra significativa respectivamente.

3. Distribución triangular

Como en una distribución rectangular, para una magnitud de entrada X_i que tiene una distribución triangular con el límite superior a_+ y el límite inferior a_- , el valor estimado x_i vendrá dado por la ecuación 4.6, donde la incertidumbre típica será calculada por la expresión 4.8.

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{24}} \quad (4.8)$$

Si los límites superior e inferior son simétricos con respecto a x_i , $a_+ - a_- = 2a$ y $u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$.

- ✓ Es importante destacar que la expresión 4.6 ha sido obtenida haciendo uso de la definición de esperanza matemática (ecuación 4.9), y que las expresiones 4.7 y 4.8 se han calculado recurriendo a la definición de desviación típica (ecuación 4.10), tal y como ambas definiciones figuran en el Anexo C de la GUM.

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot p(x) dx \quad (4.9)$$

$$s^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 \cdot p(x) dx \quad (4.10)$$

donde $p(x)$ es la función de densidad de probabilidad de X_i para cada una de las distribuciones bajo estudio (rectangular o uniforme y triangular).

4.2.3. Evaluación de la incertidumbre típica combinada

Esta incertidumbre es el resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes. Se denomina $u_c(y)$ y contiene toda la información esencial sobre la incertidumbre del mensurando Y .

La contribución $u_i(y)$ de cada fuente a la incertidumbre combinada depende de la incertidumbre típica $u(x_i)$ de la propia fuente (sea de Tipo "A" o "B") y del impacto de la misma sobre el mensurando. Esta contribución se define mediante la expresión 4.11.

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad (4.11)$$

donde c_i es el *coeficiente de sensibilidad* (factor que indica el peso o influencia de la magnitud de entrada sobre la magnitud de salida o mensurando).

Este coeficiente de sensibilidad se puede determinar a través de dos métodos distintos:

- A partir de una relación funcional

Si el modelo matemático de la ecuación 4.1 describe la influencia de la magnitud de entrada X_i suficientemente bien mediante una relación funcional, el coeficiente de sensibilidad c_i se calcula por la derivada parcial de f con respecto a X_i , tal y como muestra la igualdad 4.12.

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Bigg|_{X_1=x_1, \dots, X_N=x_N} \quad (4.12)$$

- A partir de otras formas

Si la influencia de la magnitud de entrada X_i en el mensurando Y no está representada por una relación funcional, el coeficiente de sensibilidad c_i se determina por una estimación del impacto de variación de X_i en Y según la expresión 4.13.

$$c_i = \frac{\Delta Y}{\Delta X_i} \quad (4.13)$$

Este método consiste en, manteniendo constantes las demás magnitudes de entrada, determinar el cambio de Y , el cual es producido por una modificación en X_i debido a una medición o información disponible (como una gráfica o una tabla).

Por lo tanto, y considerando que las magnitudes de entrada no están correlacionadas (no existe una relación entre las magnitudes de entrada), podremos calcular la incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ por medio de la suma geométrica de las contribuciones particulares, tal y como muestra la expresión 4.14.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (4.14)$$

La mayoría de procedimientos de estimación de incertidumbre en acústica considera todas las variables de entrada incorreladas. Esta misma orientación se va a seguir en este proyecto, puesto que, en cualquier caso, este hecho simplemente mayorará el resultado, protegiendo al destinatario del informe. En el Capítulo 5 de la GUM hay información para calcular los coeficientes de correlación.

Aplicando las ecuaciones 4.11 y 4.12 a la igualdad 4.14, y posteriormente despejando $u_c(y)$, obtenemos finalmente la expresión 4.15 que muestra la *incertidumbre típica combinada*.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\left. \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{X_1=x_1, \dots, X_N=x_N} \cdot u(x_i) \right]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right]^2} \quad (4.15)$$

- ✓ Esta última expresión se conoce formalmente como la “Ley de Propagación de Incertidumbre” y sólo es aplicable cuando se dispone de la relación funcional entre Y y $\{x_i\}$.

4.2.4. Evaluación de la incertidumbre expandida

Tal y como adelantamos estimando la desviación típica en una distribución normal, la *incertidumbre expandida* U se obtiene multiplicando la incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ por un factor de cobertura k , tal y como muestra la expresión 4.16.

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (4.16)$$

De este modo, se puede expresar el resultado de una medición en la forma $Y = y \pm U$, lo que se interpreta como que la mejor estimación del valor atribuible al mensurando Y es y , donde puede esperarse que en el intervalo que va de $y - U$ a $y + U$ esté comprendida una fracción importante de la distribución de valores que podrían ser razonablemente atribuidos a Y . Un intervalo tal se expresa por $y - U \leq Y \leq y + U$.

El valor de k se elige en función del nivel de confianza requerido para el intervalo. En general, para una distribución normal, toma un valor entre 2 ($\approx 95\%$) y 3 ($\approx 99\%$). La distribución Y se puede considerar normal si las componentes que no se distribuyen de forma normal no dominan a las componentes que se distribuyen de forma normal. Las condiciones que favorecen que la incertidumbre típica se aproxime a una distribución normal son:

- ✓ Que el mensurando Y sea estimado a partir de un número significativo de argumentos X_i que pueden ser descritos mediante distribuciones de probabilidad bien definidas (normales, rectangulares...).
- ✓ Las contribuciones de las estimaciones de los argumentos contribuyen en cantidades comparables, ya sean estimadas como una incertidumbre Tipo “A” o “B”.
- ✓ La función modelo bajo estudio tiene un comportamiento lineal.
- ✓ La incertidumbre asignada a cada argumento posee un número no pequeño ($n > 30$) de grados de libertad. Se denomina *grado de libertad* de un estadístico al número de observaciones independientes que se necesitan para su cálculo, menos el número de restricciones que van ligadas a ellas y al estadístico. Generalmente su valor es $n - 1$.

Cuando estas condiciones no se dan, es necesario realizar una estimación de la incertidumbre a partir de los denominados *grados efectivos de libertad*, los cuales vienen dados por la ecuación 4.17.

$$v_{efec} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (4.17)$$

donde $u_c(y)$ es la incertidumbre típica combinada, $u_i(y)$ es cada una de las incertidumbres típicas y v_i es el número de grados de libertad que se corresponde con cada una de ellas.

Una vez calculados pueden aplicarse para determinar el factor de cobertura k_p haciendo uso de una tabla de “t – Student” para el nivel de confianza deseado. De esta forma, la *incertidumbre expandida* se obtiene tal y como muestra la expresión 4.18.

$$U_p = k_p \cdot u_c(y) \quad (4.18)$$

De nuevo, es norma general el uso de $k = 2$ en la mayoría de métodos de estimación de incertidumbre, y es la orientación que aquí se seguirá.

4.3. EJEMPLO: DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE UNA SALA

Se ha decidido poner como ejemplo de cálculo de incertidumbre, un simple experimento consistente en la determinación del volumen de una sala con el fin de ilustrar los principios fundamentales presentados anteriormente para la evaluación y expresión de la incertidumbre de medida.

4.3.1. Análisis

Supongamos una sala (Figura 4.1) que presenta forma de paralelepípedo de la que necesitamos conocer su volumen. Como sabemos, el volumen de un paralelepípedo se calcula multiplicando las longitudes de las tres aristas convergentes a un vértice, tal y como define la expresión 4.19.

$$V [m^3] = x \cdot y \cdot z \quad (4.19)$$

donde $x[m]$, $y[m]$ y $z[m]$ son las dimensiones de la sala que definen el volumen de la misma.

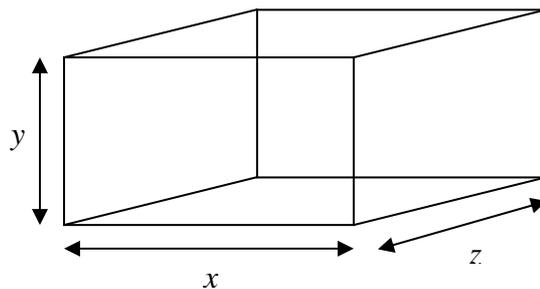


Figura 4.1 – Sala bajo medición.

Para obtener las dimensiones es necesario medir la longitud de cada una de ellas. Para ello, dos operarios se van a encargar de efectuar las mediciones. Uno dispondrá de una cinta métrica para llevar a cabo las medidas y otro medirá las longitudes mediante un metro láser.

4.3.2. Fuentes de incertidumbre

Los dos operarios van a efectuar diferentes medidas, donde las condiciones de medida y la incertidumbre asociada *a priori* serán distintas ya que el método y la precisión de los instrumentos de medida son diferentes.

El primer operario, puesto que realiza un trabajo que requiere más esfuerzo, realizará 2 medidas en total (1 de la longitud de z y 1 de la longitud de y). El segundo operario, ya que únicamente debe apuntar y presionar un botón para obtener el dato, efectuará 5 medidas en total (5 de la longitud de x). Por lo tanto, las fuentes de incertidumbre asociadas a este procedimiento podrían ser las siguientes:

- Efectuar observaciones repetidas de una longitud en las mismas condiciones y con el mismo instrumento de medida.
- Cometer desviaciones angulares durante la medida con respecto a la normal (posición de 0° en la dirección de medida), debido a desviar inconscientemente la cinta métrica cuando se extiende.
- Resolución de los dos instrumentos de medida empleados (cinta métrica y metro láser).
- Precisión del metro láser.

4.3.3. Modelo matemático a estudiar

El modelo matemático a estudiar es el propio volumen de la sala definido por la igualdad 4.19.

4.3.4. Toma de datos.

Una vez efectuadas las medidas, se obtienen los resultados que muestra la Tabla 4.1, algunos de los cuales analizaremos más adelante.

	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}	s_x	s_y	s_z
x	4,50	4,49	4,50	4,51	4,50	4,50	-	-	$7,071 \cdot 10^{-3}$	-	-
y	2,50	-	-	-	-	-	2,50	-	-	0	-
z	3,10	-	-	-	-	-	-	3,10	-	-	0

Tabla 4.1 – Medidas experimentales, medias y desviaciones típicas.

4.3.5. Evaluación de la incertidumbre típica

- Tipo "A"

La *incertidumbre debido a la repetibilidad de las observaciones* vendrá dada por la repetición de las 5 medidas que realiza el segundo operario de la longitud x . La dispersión de las medidas la obtendremos calculando la desviación típica experimental mediante la expresión 4.20.

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{5-1} \cdot \sum_{j=1}^5 (x_j - \bar{x})^2} \quad (4.20)$$

donde x_j [m] es cada una de las 5 medidas realizadas y \bar{x} [m] es la media de las 5 medidas, que viene dada por la expresión 4.21.

$$\bar{x} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{j=1}^5 x_j \quad (4.21)$$

Entonces la incertidumbre típica de la longitud se obtiene mediante el cálculo de la desviación típica experimental de la media aritmética (ecuación 4.22).

$$u_{rep}(x) = \frac{s_x}{\sqrt{5}} = 3,162 \cdot 10^{-3} \text{ [m]} \quad (4.22)$$

✓ El valor obtenido, tanto de la media, como de la desviación típica experimental para cada una de las tres longitudes, se muestra en la Tabla 4.1.

- Tipo “B”

Analizando las especificaciones técnicas de la cinta métrica y del metro láser tendremos que:

- *Cinta métrica:* Resolución = 1mm
- *Metro láser:* Resolución = 1mm Precisión = ± 2 mm

Suponiendo una distribución rectangular o uniforme, la *incertidumbre típica debido a la resolución de ambos instrumentos* vendrá dada por la expresión 4.23.

$$u_{res} = \frac{Resolución}{\sqrt{3}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 5,7735 \cdot 10^{-4} \text{ [m]} \quad (4.23)$$

Considerando que el fabricante no aporta información sobre la distribución de probabilidad empleada en el cálculo de la precisión del aparato de medida, se debe suponer la peor distribución de las tres estudiadas, es decir, la distribución rectangular o uniforme. Esta distribución se considera la peor de todas puesto que supone la misma probabilidad para cada una de las medidas posibles. Por lo tanto, el desconocimiento de la distribución empleada implica tener que aplicar esta distribución para poder proteger al destinatario. De este modo, la *incertidumbre típica debida a la precisión del metro láser* vendrá dada por la expresión 4.24.

$$u_{pre} = \frac{Precisión}{\sqrt{3}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 1,1547 \cdot 10^{-3} \text{ [m]} \quad (4.24)$$

Si además de las especificaciones técnicas, suponemos que el primer operario puede desviarse ± 0,5 ° con respecto a la normal (posición de 0° en la dirección de medida) a la hora de efectuar las medidas, obtendremos la *incertidumbre típica debido a la desviación angular*. Debido al posicionamiento de la cinta métrica y al método de operación, se estima, por experiencias anteriores, un error máximo de ± 10 cm para medidas inferiores a 10 m. Suponiendo este error equiprobable podemos aproximar el cálculo mediante una distribución rectangular o uniforme obteniendo así la *incertidumbre típica debido a la desviación angular*, que vendrá dada por la expresión 4.25

$$u_{des} = \frac{Desviación}{\sqrt{3}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,0577 \text{ [m]} \quad (4.25)$$

Se es consciente de que, como en la mayoría de estimaciones de incertidumbre, esta componente estará mayorada para medidas inferiores a 10 m.

Por lo tanto, las *incertidumbres típicas asociadas a cada longitud* estarán formadas por cada una de las fuentes de incertidumbre que contribuyen a la misma (sean de Tipo “A” o “B”), tal y como se indica en la GUM, y que en este caso se definen por las ecuaciones 4.26, 4.27 y 4.28.

$$u(x) = \sqrt{u_{res}^2(x) + u_{pre}^2(x) + u_{rep}^2(x)} = \sqrt{(5,7735 \cdot 10^{-4})^2 + (1,1547 \cdot 10^{-3})^2 + (3,162 \cdot 10^{-3})^2} = 3,4154 \cdot 10^{-3} \text{ [m]} \quad (4.26)$$

$$u(y) = \sqrt{u_{res}^2(y) + u_{des}^2(y)} = \sqrt{(5,7735 \cdot 10^{-4})^2 + (0,0577)^2} = 0,0577 \text{ [m]} \quad (4.27)$$

$$u(z) = \sqrt{u_{res}^2(z) + u_{des}^2(z)} = \sqrt{(5,7735 \cdot 10^{-4})^2 + (0,0577)^2} = 0,0577 \text{ [m]} \quad (4.28)$$

4.3.6. Evaluación de la incertidumbre típica combinada

Lo primero que se debe hacer para calcular la incertidumbre típica combinada, es obtener los diferentes coeficientes de sensibilidad que relacionan las magnitudes de entrada con la magnitud de salida, a través de la igualdad 4.12. Para ello, derivamos la función modelo respecto de cada una de las entradas, tal y como figura en las expresiones 4.29, 4.30 y 4.31.

$$c_x = \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial [x \cdot y \cdot z]}{\partial x} = y \cdot z \quad (4.29)$$

$$c_y = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial [x \cdot y \cdot z]}{\partial y} = x \cdot z \quad (4.30)$$

$$c_z = \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{\partial [x \cdot y \cdot z]}{\partial z} = x \cdot y \quad (4.31)$$

donde se puede comprobar cómo la influencia de la incertidumbre en una dimensión, como por ejemplo x , depende de cuan grandes son las otras dimensiones, a través del factor $c_x = y \cdot z$. Particularizando para las medidas realizadas, el valor de los coeficientes es:

$$c_x = \bar{y} \cdot \bar{z} = 2,50 \cdot 3,10 = 7,75 \quad [\text{m}^2] \quad (4.32)$$

$$c_y = \bar{x} \cdot \bar{z} = 4,50 \cdot 3,10 = 13,95 \quad [\text{m}^2] \quad (4.33)$$

$$c_z = \bar{x} \cdot \bar{y} = 4,50 \cdot 2,50 = 11,25 \quad [\text{m}^2] \quad (4.34)$$

Por lo tanto, la *incertidumbre típica combinada* vendrá dada por la ecuación 4.35.

$$u_c(V) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2} = \sqrt{[c_x \cdot u(x)]^2 + [c_y \cdot u(y)]^2 + [c_z \cdot u(z)]^2} \quad (4.35)$$

donde sustituyendo los valores de las incertidumbres típicas y los coeficientes de sensibilidad para cada una de las tres longitudes medidas, obtendremos la expresión 4.36.

$$\begin{aligned} u_c(V) &= \sqrt{[7,75 \cdot 3,4154 \cdot 10^{-3}]^2 + [13,95 \cdot 0,0577]^2 + [11,25 \cdot 0,0577]^2} = \\ &= \sqrt{1,069} = 1,034 \quad [\text{m}^3] \end{aligned} \quad (4.36)$$

4.3.7. Evaluación de la incertidumbre expandida

Suponiendo una distribución normal y un factor de cobertura igual a 2, la *incertidumbre expandida* vendrá dada por la ecuación 4.37.

$$U = k \cdot u_c(V) \quad (4.37)$$

Sustituyendo cada uno de los valores calculados anteriormente obtendremos la expresión 4.38.

$$U = 2 \cdot 1,034 = 2,068 \quad [\text{m}^3] \quad (4.38)$$

4.3.8. Determinación del volumen de la sala

Una vez obtenida la incertidumbre expandida, se puede calcular finalmente el volumen de sala mediante la expresión 4.39.

$$V [m^3] = (x \cdot y \cdot z) \pm (U) \quad (4.39)$$

donde particularizando para las medidas realizadas y sustituyendo los datos obtenidos, vendrá dado por la ecuación 4.40.

$$V [m^3] = (\bar{x} \cdot \bar{y} \cdot \bar{z}) \pm (U) = (4,50 \cdot 2,50 \cdot 3,10) \pm 2,068$$

$$V [m^3] = 34,875 \pm 2,068 \quad (4.40)$$

4.3.9. Conclusiones

- Si analizamos los diferentes coeficientes de sensibilidad, podemos ver que c_y es el mayor de los tres calculados, por lo tanto nos indica que y es la magnitud de entrada que más influencia tiene en la determinación del volumen del recinto. Esto se debe a que el valor de c_y ha sido obtenido por el producto de las dimensiones más grandes de la sala (“ x ” y “ z ”).
- Dado que c_y es el coeficiente con mayor peso, será también el coeficiente que más contribuya a la incertidumbre típica combinada. Por otro lado, dado que la incertidumbre asociada al cálculo de la magnitud x , $u(x)$, es la que presenta el menor valor de las tres incertidumbres típicas asociadas a las magnitudes x , y , z calculadas, resulta ser la magnitud de entrada que individualmente menos incertidumbre conlleva. El motivo por el cual se produce este fenómeno es porque la incertidumbre típica asociada al metro láser es mucho menor que la incertidumbre típica asociada a la cinta métrica, debido a que ésta última se encuentra influenciada por la desviación angular, a diferencia del metro láser, que se ha supuesto exento de dicha influencia.
- Según el cálculo obtenido, el volumen estimado de la sala es de $34,875 \text{ m}^3$. Sin embargo, el hecho de emplear dos instrumentos de medida distintos con sus correspondientes incertidumbres asociadas implica que éste, pueda o no, coincidir con el valor exacto o verdadero del volumen del recinto bajo estudio. Haciendo uso de la cinta métrica y el metro láser para determinar el volumen de la sala, se puede afirmar que el valor verdadero del mismo puede oscilar entre los $36,943 \text{ m}^3$ y los $32,807 \text{ m}^3$ con una confianza del 95 %, llevando asociado un error que viene dado por la expresión 4.41.

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Error absoluto}}{\text{Volumen exacto}} \cdot 100 = \frac{2,068}{34,875} \cdot 100 = 5,93 \text{ [\%]} \quad (4.41)$$

Por lo tanto, no se puede obtener el valor verdadero del volumen del recinto, pero si se puede afirmar que para un intervalo de confianza del 95 % ($k = 2$) el valor exacto se encuentra entre los $36,943 \text{ m}^3$ y los $32,807 \text{ m}^3$, siendo éste el conjunto de posibles valores para los cuales se comete como máximo un 5,93 % de error en su estimación.

4.4. MOTIVACIÓN DEL CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE EN MEDIDAS DE AISLAMIENTO

Tal y como se ha visto a lo largo de todo el proyecto, las mediciones in situ de aislamiento acústico conllevan un análisis espectral del sonido, proporcionando valores en cada banda de frecuencia. En la medición del aislamiento a ruido aéreo entre locales, es posible obtener tanto el *índice de reducción sonora aparente* (R'), como la *diferencia de niveles normalizada* (D_n) o la *diferencia de niveles estandarizada* (D_{nT}), para el margen frecuencial considerado. Según la norma UNE – EN ISO 140 – 4: 1999, es necesario como mínimo la realización de 10 mediciones del nivel de emisión, 10 del nivel de recepción, 6 medidas del tiempo de reverberación y la medición del nivel de ruido de fondo (nivel para el cual no se especifica un número mínimo de realizaciones, por lo que efectuar 3 medidas del mismo, podría ser una buena elección de cara a reducir la incertidumbre).

Posteriormente, se posibilita la evaluación del aislamiento global por el método de comparación según la norma UNE – EN ISO 717 – 1: 1997, lo que implica un ajuste mediante una curva de referencia para su cálculo.

Toda esta metodología de trabajo, junto con otras circunstancias que se analizarán después, introduce una incertidumbre de medida, tal y como acabamos de ver en el Capítulo 3. Por este motivo, es necesario efectuar una estimación de dicha incertidumbre, por medio de alguno de los procedimientos disponibles.

Existen tres métodos principales que permiten calcular la incertidumbre en un ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales:

1. Método de propagación de incertidumbres

Es el método que ha sido usado anteriormente en el ejemplo de la estimación del volumen de una sala. Este método parece el más apropiado para emplearlo en los cálculos de incertidumbre de medida en aislamiento, ya que el aislamiento acústico no se mide, sino que se calcula basado en distintas magnitudes medidas que pueden considerarse magnitudes de entrada.

Por ejemplo, el nivel de presión sonora en los recintos receptor y emisor, o el tiempo de reverberación en el recinto receptor, entre otros, son magnitudes de entrada medibles, que en función de cómo se obtengan, afectarán en mayor o menor medida y de manera distinta a la magnitud de salida; es decir, al aislamiento calculado. Por lo anterior, éste es el método a emplear en este proyecto.

2. Método de Montecarlo

Es un método de simulación numérica que proporciona una solución práctica para modelos complicados o modelos con magnitudes de entrada que tienen una gran incertidumbre o funciones de densidad de probabilidad asimétricas, facilitando la evaluación de la incertidumbre cuando no se cumplen las condiciones para aplicar el primer método. El resultado presenta una aproximación numérica de la función de distribución para el valor de la magnitud de salida, desde la cual se pueden obtener los valores de incertidumbre de medida requeridos.

3. Método de repetibilidad

Tal y como indica su nombre, este método consiste en la repetición del ensayo un número elevado de veces bajo unas mismas condiciones permanentes (procedimiento y equipo de medida idénticos, en donde lo único que varía es el tiempo y las posiciones fuente – micrófono). Si por ejemplo, se repitiera el ensayo 20 veces, esto implicaría multiplicar por 20 cada una de las medidas que se deben efectuar. Es decir, sería necesario la realización de 200 mediciones del nivel de emisión, 200 del nivel de recepción, 60 medidas del ruido de fondo y 120 medidas del tiempo de reverberación, teniendo en cuenta el cambio de posiciones de micrófono y el cálculo de distancias micrófono – fuente que conlleva. Como es evidente, este método es mucho más laborioso, acarreando mucho esfuerzo y coste.

Por otro lado, es importante hacer notar que para la evaluación de las magnitudes globales, los procedimientos analíticos de evaluación de propagación de la incertidumbre que hemos explicado en el apartado 4.2 pueden no ser adecuados debido al tipo de cálculos y operaciones matemáticas necesarios para su obtención.

Dado que el método de ajuste de la curva de referencia para obtener el valor global no es lineal, no es posible el uso del método de propagación de incertidumbre. Además, el método de comparación empleado para la obtención de las magnitudes globales no es expresable funcionalmente, sino que se alcanza mediante un algoritmo iterativo. La estimación de la incertidumbre mediante simulación por métodos de Montecarlo podría ser una solución a este problema.

4.5. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE EN AISLAMIENTO ACÚSTICO

4.5.1. Análisis

Supongamos un ensayo como el del esquema de la Figura 2.1. Realizar un estudio acústico completo del mismo implica estimar la incertidumbre de medida asociada a las expresiones 2.13, 2.15 y 2.20 vistas en el Capítulo 2, las cuales por comodidad se repiten aquí, renombradas como 4.42, 4.43 y 4.44.

$$D_n \text{ [dB]} = L_1 - L_2 - 10 \cdot \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (4.42)$$

$$D_{nT} \text{ [dB]} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (4.43)$$

$$R' \text{ [dB]} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (4.44)$$

4.5.2. Modelo matemático a estudiar

De los tres índices que definen el aislamiento a ruido aéreo entre locales, se va a desarrollar la estimación de la incertidumbre para la *diferencia de niveles estandarizada* (D_{nT}). Este mismo análisis podría aplicarse a los otros dos índices, teniendo en cuenta que la *diferencia de niveles normalizada* (D_n) depende tanto del tiempo de reverberación como del volumen del recinto receptor y que el *índice de reducción sonora aparente* (R'), además de depender de éstos, también lo hace de la superficie del elemento separador de ambos recintos. El modelo matemático de la *diferencia de niveles estandarizada* (D_{nT}) vendrá dado por la expresión 4.45.

$$D_{nT} \text{ [dB]} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \quad (4.45)$$

donde, para cada una de las 16 frecuencias bajo estudio,

- L_1 [dB] es el nivel medio de presión sonora medido en el recinto emisor.
- L_2 [dB] es el nivel medio de presión sonora medido en el recinto receptor.
- T [s] es el tiempo de reverberación medido en el recinto receptor.

Esta igualdad que define la *diferencia de niveles estandarizada* (D_{nT}), se calcula a partir de una serie de magnitudes medibles (como son L_1 , L_2 y T), que requieren un procedimiento de medida en particular y que por lo tanto llevan ligado una serie de fuentes de incertidumbre que se deben tener en cuenta.

4.5.3. Identificación de las fuentes de incertidumbre

1. Que afectan a L_1

- La repetibilidad de las medidas del nivel de presión sonora.
- El empleo del sonómetro como instrumento de medida.

2. Que afectan a L_2

- Las mismas fuentes que para L_1 .
- El nivel de ruido de fondo (L_{RF}) cuando $L_2 - L_{RF} < 10$ [dB], el cual a su vez se ve afectado por las mismas fuentes que para L_1 al ser un nivel de presión sonora medido.

3. Que afectan a T

- En función del tipo de procedimiento usado para medir T , existe una incertidumbre en la medida. En este proyecto, se supone que se utiliza el método de ruido interrumpido.
- La resolución del sonómetro como instrumento de medida.

4.5.4. Evaluación de la incertidumbre típica

1. Asociada a L_1

Los niveles de presión sonora medidos en función de la frecuencia, L_j [dB], a partir de los cuales se calcula el nivel medio de presión sonora en el recinto emisor, L_1 , son generadores de una incertidumbre debida a las diferentes medidas que se registran (al menos 10).

Debido al carácter del campo sonoro difuso, que se produce tanto en el local emisor (L_1) y receptor (L_2), se considera equivalente realizar medidas distribuidas en el espacio, o medidas en un punto fijo, variando el instante temporal. Por ello, se asume que las diferentes medidas de L_1 (o L_2 en su caso) contribuyen como componente "Tipo A".

Tal y como se definió en la ecuación 2.2 (la cual por comodidad se repite aquí renombrada como 4.46) del Capítulo 2, L_1 se obtiene a partir del cálculo de la *media energética* del número de niveles de presión sonora, n , medidos para cada una de las 16 frecuencias de interés.

$$L_1 = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) \quad (4.46)$$

Este hecho implica que la dispersión de las medidas tenga que obtenerse en unidades naturales (como son los [Pa]) en vez de en unidades logarítmicas (como son los [dB]). Por lo tanto, teniendo en cuenta que la señal emitida por la fuente sonora es ruido de banda ancha (es decir, emite a todas las frecuencias), los niveles medidos deben tratarse como señales "no coherentes" (es decir, como presiones al cuadrado). Para realizar la conversión de niveles se hace uso de la ecuación 4.47.

$$P_j^2 = 10^{\frac{L_j}{10}} \cdot P_0^2 \quad (4.47)$$

donde P_j [Pa] es la presión sonora de cada uno de los niveles medidos y P_0 [Pa] es la presión de referencia cuyo valor es igual a $2 \cdot 10^{-5}$.

Aplicando la conversión de niveles anterior, se obtiene que la presión sonora media en el recinto emisor, P_1 [Pa], vendrá dada por la expresión 4.48.

$$P_1^2 = \frac{\sum_{j=1}^n P_j^2}{n} \quad (4.48)$$

De este modo, la dispersión de las medidas se obtiene finalmente calculando la desviación típica experimental mediante la igualdad 4.49, donde la nueva unidad de referencia ya no es el [dB], sino el [Pa]².

$$s(P_1^2) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (P_j^2 - P_1^2)^2} \quad [\text{Pa}]^2 \quad (4.49)$$

Teniendo esto en cuenta, la incertidumbre de L_1 debida a la repetibilidad, vendrá dada por la ecuación 4.50.

$$u_{rep}(L_1) = \sqrt{u_{rep}^2(P_1^2) \cdot c_{P_1^2}^2} \quad [*] \quad (4.50)$$

donde $u_{rep}(P_1^2)$ es la incertidumbre de P_1^2 debida a la repetibilidad (expresión 4.51) y $c_{P_1^2}$ el coeficiente de sensibilidad (igualdad 4.52) que relaciona la presión media con el nivel medio de presión sonora, cuyo desarrollo matemático puede consultarse en el Anexo 2 (ecuación A2.1).

$$u_{rep}(P_1^2) = \frac{s(P_1^2)}{\sqrt{n}} \quad [\text{Pa}]^2 \quad (4.51)$$

$$c_{P_1^2} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial P_1^2} = \dots = \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{1}{P_1^2} \quad [\text{Pa}]^2 \quad (4.52)$$

✓ El símbolo (*) indica que el resultado de la expresión 4.50 es adimensional.

Por otro lado, el empleo del analizador sonoro para efectuar las medidas del nivel de presión sonora, implica una fuente muy importante de aporte de incertidumbre (incertidumbre Tipo "B"). Su estimación puede realizarse haciendo uso de los valores de calibración conforme a la norma [48]. Según el documento [40] de Abril de 2004, el autor Richard Payne reconoce hasta 15 componentes distintas que contribuyen a la incertidumbre, las cuales derivan del instrumento de medida, tal y como se detallan en el Anexo 3, y que por lo tanto, deberán tenerse en cuenta a la hora de estimarla.

Es importante destacar que existen varias normas, artículos y estudios que consideran que toda la serie de componentes que figuran en el anexo anterior puede reducirse a valores estimados que simplifican y facilitan los cálculos. Por ejemplo, la UNE – EN ISO 1996 – 2: 2009. "Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: Determinación de los niveles de ruido ambiental", determina que la incertidumbre típica debida a la instrumentación puede aproximarse a 1 [dB].

Esta consideración podemos aplicarla directamente a nuestro estudio, puesto que las especificaciones y características técnicas que debe cumplir un sonómetro para medir aislamiento a ruido aéreo son las mismas que debe cumplir para medir ruido ambiental. Por otra parte, el proyecto [41] de Enero de 2006, considera que la incertidumbre típica debida a la instrumentación puede aproximarse a 0,5 [dB].

Por lo tanto, de los dos valores de aproximación propuestos, se elige el de 1 [dB] como valor de incertidumbre típica debida a la instrumentación, tal y como indica la expresión 4.53.

$$u_{slm}(L_1) = 1 \quad [\text{dB}] \quad (4.53)$$

Es esperable que esta aproximación mayor el resultado a cambio de una mejor protección del destinatario y un aporte de sencillez a los cálculos de incertidumbre.

2. Asociada a L_2

Del mismo modo que con L_1 , para L_2 la incertidumbre típica debida a la repetibilidad vendrá dada por la expresión 4.54.

$$u_{rep}(L_2) = \sqrt{u_{rep}^2(P_2^2) \cdot c_{P_2^2}^2} \quad [*] \quad (4.54)$$

donde $u_{rep}(P_2^2)$ es la incertidumbre de P_2^2 debida a la repetibilidad (expresión 4.55) y $c_{P_2^2}$ el coeficiente de sensibilidad (igualdad 4.56) que relaciona la presión media con el nivel medio de presión sonora, cuyo desarrollo matemático puede consultarse en el Anexo 2 (ecuación A2.2).

$$u_{rep}(P_2^2) = \frac{s(P_2^2)}{\sqrt{n}} \quad [\text{Pa}]^2 \quad (4.55)$$

$$c_{P_2^2} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial P_2^2} = \dots = \frac{-10}{\ln 10} \cdot \frac{1}{P_2^2} \quad [\text{Pa}]^2 \quad (4.56)$$

Y por otro lado, la incertidumbre típica asociada al instrumento de medida, vendrá definida por la igualdad 4.57.

$$u_{slm}(L_2) = 1 \quad [\text{dB}] \quad (4.57)$$

3. Asociada a T

Todos los tiempos de caída del nivel de presión sonora medidos en función de la frecuencia, T_j [s], a partir de los que se calcula el tiempo medio de reverberación en el recinto receptor, son generadores de una incertidumbre debida a su repetibilidad (incertidumbre Tipo "A"). La incertidumbre típica asociada a estos tiempos, considerados como variables de entrada, vendrá dada por las expresiones 4.58 y 4.59 para cada una de las 16 frecuencias de interés, las cuales están definidas en la norma [47] y se describen en función de un rango de evaluación de 20 dB o de 30 dB, respectivamente.

$$u_{rep}(T) = 0,88 \cdot T_{20j} \cdot \sqrt{\frac{1 + (1,9/n)}{N \cdot B \cdot T_{20j}}} \quad [\text{s}] \quad (4.58)$$

$$u_{rep}(T) = 0,55 \cdot T_{30j} \cdot \sqrt{\frac{1 + (1,52/n)}{N \cdot B \cdot T_{30j}}} \quad [\text{s}] \quad (4.59)$$

siendo,

- B [Hz] el ancho de banda, donde para un filtro de tercio de octava se puede calcular como $B = 0,23 \cdot f$, si f [Hz] es la frecuencia bajo estudio.
- N el número de posiciones de medición (combinación de fuente y micrófono).
- n el número de medidas en cada posición.
- T_{20j} [s] o T_{30j} [s] el tiempo de reverberación en función de un rango de evaluación de 20 dB o 30 dB respectivamente.

Por otro lado, suponiendo una distribución rectangular o uniforme, la incertidumbre típica en función de la frecuencia debida a la resolución del instrumento de medida (incertidumbre Tipo "B"), vendrá dada por la expresión 4.60.

$$u_{res}(T) = \frac{\text{Resolución}}{\sqrt{3}} \quad [\text{s}] \quad (4.60)$$

donde normalmente el valor de la resolución es igual a 0,01 [s], de manera que la expresión anterior se puede particularizar en la igualdad 4.61.

$$u_{res}(T) = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \quad [\text{s}] \quad (4.61)$$

- ✓ Por lo tanto, las incertidumbres típicas asociadas a cada magnitud medible (L_1 , L_2 y T) estarán formadas por cada una de las fuentes de incertidumbre que contribuyen a la misma (sean de Tipo "A" o "B"), tal y como se indica en la GUM, y que en este caso se definen por las ecuaciones 4.62, 4.63 y 4.64.

$$u(L_1) = \sqrt{u_{rep}^2(L_1) + u_{slm}^2(L_1)} \quad [\text{dB}] \quad (4.62)$$

$$u(L_2) = \sqrt{u_{rep}^2(L_2) + u_{slm}^2(L_2)} \quad [\text{dB}] \quad (4.63)$$

$$u(T) = \sqrt{u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)} \quad [\text{s}] \quad (4.64)$$

Sin embargo, dado que para medir ambos niveles (L_1 y L_2) se emplea la misma instrumentación (ej.: sonómetro), existe una cierta correlación entre ellos, y considerando además que se está mayorando la incertidumbre debida a la instrumentación en cada medida del nivel sonoro, se puede extraer de cada ecuación la incertidumbre típica asociada a la instrumentación de cada uno de los niveles calculados y proponerla como fuente de incertidumbre típica común a todos ellos, sumándola directamente como una incertidumbre general asociada al cálculo de incertidumbre de la expresión 4.45. De este modo, las expresiones 4.62 y 4.63 podrán reescribirse como las ecuaciones 4.65 y 4.66.

$$u(L_1) = \sqrt{u_{rep}^2(L_1)} = u_{rep}(L_1) \quad [*] \quad (4.65)$$

$$u(L_2) = \sqrt{u_{rep}^2(L_2)} = u_{rep}(L_2) \quad [*] \quad (4.66)$$

4.5.5. Evaluación de la incertidumbre típica combinada

Según el método de propagación de incertidumbre, para calcular la incertidumbre típica combinada, se deben obtener los diferentes coeficientes de sensibilidad que relacionan las magnitudes de entrada con la magnitud de salida, haciendo uso de la igualdad 4.12. Para ello, derivamos la función modelo 4.45 respecto de cada una de las entradas, obteniéndose así las expresiones 4.67, 4.68 y 4.69, cuyo desarrollo matemático puede consultarse en el Anexo 2 (ecuaciones A2.3, A2.4 y A2.5).

$$c_{L_1} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial L_1} = \dots = 1 \quad [*] \quad (4.67)$$

$$c_{L_2} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial L_2} = \dots = -1 \quad [*] \quad (4.68)$$

$$c_T = \frac{\partial D_{nT}}{\partial T} = \dots = \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{1}{T} \quad [s^{-1}] \quad (4.69)$$

La *incertidumbre típica combinada*, vendrá dada por la ecuación 4.70 para cada una de las 16 frecuencias de interés.

$$u_c(D_{nT}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2} = \sqrt{[c_{L_1} \cdot u(L_1)]^2 + [c_{L_2} \cdot u(L_2)]^2 + [c_T \cdot u(T)]^2 + [u_{slm}(L_i)]^2} \quad [dB] \quad (4.70)$$

Si calculamos cada uno de los productos individuales que la forman, teniendo en cuenta los valores de las igualdades 4.53, 4.57, 4.64, 4.65, 4.66, 4.67, 4.68 y 4.69, obtendremos las expresiones 4.71, 4.72, 4.73 y 4.74.

$$c_{L_1} \cdot u(L_1) = u_{rep}(L_1) \quad [*] \quad (4.71)$$

$$c_{L_2} \cdot u(L_2) = -u_{rep}(L_2) \quad [*] \quad (4.72)$$

$$c_T \cdot u(T) = \left(\frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{1}{T} \right) \cdot \left(\sqrt{u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)} \right) = \frac{10 \cdot \sqrt{u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)}}{\ln 10 \cdot T} \quad [*] \quad (4.73)$$

$$u_{slm}(L_i) = 1 \quad [dB] \quad (4.74)$$

(considerando que el coeficiente de sensibilidad que multiplica a la incertidumbre típica asociada a la instrumentación tiene un valor igual a 1)

Por lo tanto, sustituyendo los productos en la ecuación 4.70, obtendremos la expresión 4.75.

$$u_c(D_{nT}) = \sqrt{[u_{rep}(L_1)]^2 + [-u_{rep}(L_2)]^2 + \left[\frac{10 \cdot \sqrt{u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)}}{\ln 10 \cdot T} \right]^2} + 1 = \quad (4.75)$$

$$= \sqrt{u_{rep}^2(L_1) + u_{rep}^2(L_2) + \frac{100 \cdot [u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)]}{(\ln 10)^2 \cdot T^2}} + 1 \quad [\text{dB}]$$

4.5.6. Evaluación de la incertidumbre expandida

Suponiendo una distribución normal y un factor de cobertura igual a 2, la *incertidumbre expandida* vendrá dada por la ecuación 4.76.

$$U = k \cdot u_c(D_{nT}) \quad [\text{dB}] \quad (4.76)$$

siendo el valor de la incertidumbre típica combinada el obtenido en la expresión 4.75.

4.5.7. Caso particular: Estimación de la incertidumbre cuando L_2 se ve afectado por L_{RF}

En el caso de que el ruido de fondo presente durante el ensayo afecte a la medida, el modelo matemático de la *diferencia de niveles estandarizada* (D_{nT}) debe particularizarse para este caso mediante la expresión 4.77.

$$D_{nT} [\text{dB}] = L_1 - L_2' + 10 \cdot \log\left(\frac{T}{0,5}\right) \quad (4.77)$$

donde, para cada una de las 16 frecuencias bajo estudio, L_2' [dB] es el nivel medio de presión sonora calculado en el recinto receptor en ausencia del ruido de fondo, el cual viene definido por la ecuación 4.78.

$$L_2' = 10 \cdot \log(10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}) \quad (4.78)$$

siendo,

- L_2 [dB] el nivel medio de presión sonora que se obtiene de medir niveles en el recinto receptor en presencia de ruido de fondo.
- L_{RF} [dB] el nivel medio de presión sonora del ruido de fondo medido.

Por lo tanto, sustituyendo la igualdad 4.78 en la expresión 4.77, obtendremos la ecuación 4.79.

$$D_{nT} [\text{dB}] = L_1 - 10 \cdot \log(10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}) + 10 \cdot \log\left(\frac{T}{0,5}\right) \quad (4.79)$$

De este modo, en el caso de que el ruido de fondo perturbe el nivel de presión sonora medido en el recinto receptor, además de considerar la incertidumbre asociada a L_1 y T (las cuales no van a cambiar), habrá que estimar la incertidumbre asociada a L_2 y L_{RF} que son las nuevas variables de entrada.

Al igual que sucedía con L_1 , para L_2 la incertidumbre típica debida a la repetibilidad vendrá dada por la expresión 4.80.

$$u_{rep}(L_2) = \sqrt{u_{rep}^2(P_2^2) \cdot c_{P_2^2}^2} \quad [*] \quad (4.80)$$

donde $u_{rep}(P_2^2)$ es la incertidumbre de P_2^2 debida a la repetibilidad (expresión 4.81) y $c_{P_2^2}$ el coeficiente de sensibilidad (igualdad 4.82) que relaciona la presión media con el nivel medio de presión sonora, cuyo desarrollo matemático puede consultarse en el Anexo 2 (ecuación A2.6).

$$u_{rep}(P_2^2) = \frac{s(P_2^2)}{\sqrt{n}} \quad [\text{Pa}]^2 \quad (4.81)$$

$$c_{P_2^2} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial P_2^2} = \dots = \frac{-10 \cdot \left(10^{\log\left(\frac{P_2^2}{P_0^2}\right)} \right)}{10^{\log\left(\frac{P_2^2}{P_0^2}\right)} - 10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{1}{P_2^2} \quad [\text{Pa}]^{-2} \quad (4.82)$$

Y del mismo modo que se ha visto en L_2 , para L_{RF} la incertidumbre típica debida a la repetibilidad vendrá definida por la expresión 4.83.

$$u_{rep}(L_{RF}) = \sqrt{u_{rep}^2(P_{RF}^2) \cdot c_{P_{RF}^2}^2} \quad [*] \quad (4.83)$$

donde $u_{rep}(P_{RF}^2)$ es la incertidumbre de P_{RF}^2 debida a la repetibilidad (expresión 4.84) y $c_{P_{RF}^2}$ el coeficiente de sensibilidad (igualdad 4.85) que relaciona la presión media con el nivel medio de presión sonora, cuyo desarrollo matemático puede consultarse en el Anexo 2 (ecuación A2.7).

$$u_{rep}(P_{RF}^2) = \frac{s(P_{RF}^2)}{\sqrt{n}} \quad [\text{Pa}]^2 \quad (4.84)$$

$$c_{P_{RF}^2} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial P_{RF}^2} = \dots = \frac{10 \cdot \left(10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)} \right)}{10^{\log\left(\frac{P_2^2}{P_0^2}\right)} - 10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{1}{P_{RF}^2} \quad [\text{Pa}]^{-2} \quad (4.85)$$

Por otro lado, de la misma forma que sucedía con L_1 , para L_2 y L_{RF} , la incertidumbre típica asociada al instrumento de medida tendrá un valor igual a 1 [dB], tal y como indican las ecuaciones 4.86 y 4.87.

$$u_{slm}(L_2) = 1 \quad [\text{dB}] \quad (4.86)$$

$$u_{slm}(L_{RF}) = 1 \quad [\text{dB}] \quad (4.87)$$

- ✓ Por lo tanto, las incertidumbres típicas asociadas a cada nueva magnitud medible (L_2 y L_{RF}) estarán formadas por cada una de las fuentes de incertidumbre que contribuyen a la misma (sean de Tipo "A" o "B"), tal y como se indica en la GUM, y que en este caso se definen por las ecuaciones 4.88 y 4.89.

$$u(L_2) = \sqrt{u_{rep}^2(L_2) + u_{slm}^2(L_2)} \quad [\text{dB}] \quad (4.88)$$

$$u(L_{RF}) = \sqrt{u_{rep}^2(L_{RF}) + u_{slm}^2(L_{RF})} \quad [\text{dB}] \quad (4.89)$$

Sin embargo, y tal y como ya se vio en la estimación de la incertidumbre de medida sin la presencia de ruido de fondo, dado que para medir ambos niveles (L_2 y L_{RF}) se utiliza el mismo sonómetro, existe una cierta correlación entre ellos, y considerando además que se está mayorando la incertidumbre debida a la instrumentación en cada medida del nivel sonoro, se puede extraer de cada ecuación la incertidumbre típica asociada a la instrumentación de cada

uno de los niveles calculados y proponerla como fuente de incertidumbre típica común a todos ellos, sumándola directamente como una incertidumbre general asociada al cálculo de incertidumbre de la expresión 4.79. De este modo, las expresiones 4.88 y 4.89 podrán reescribirse como las ecuaciones 4.90 y 4.91.

$$u(L_2) = \sqrt{u_{rep}^2(L_2)} = u_{rep}(L_2) \quad [\text{dB}] \quad (4.90)$$

$$u(L_{RF}) = \sqrt{u_{rep}^2(L_{RF})} = u_{rep}(L_{RF}) \quad [\text{dB}] \quad (4.91)$$

Continuando con el método de propagación de incertidumbre, para calcular la incertidumbre típica combinada, se obtienen los diferentes coeficientes de sensibilidad que relacionan las magnitudes de entrada con la magnitud de salida, derivando la expresión 4.79 respecto de cada una de las entradas, obteniéndose así las expresiones 4.92 y 4.93, cuyo desarrollo matemático puede consultarse en el Anexo 2 (ecuaciones A2.8 y A2.9).

$$c_{L_2} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial L_2} = \dots = \frac{-10^{L_2/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \quad [*] \quad (4.92)$$

$$c_{L_{RF}} = \dots = \frac{10^{L_{RF}/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \quad [*] \quad (4.93)$$

Por lo tanto, la *incertidumbre típica combinada*, vendrá dada por la ecuación 4.94.

$$u_c(D_{nT}) = \sqrt{[c_{L_1} \cdot u(L_1)]^2 + [c_{L_2} \cdot u(L_2)]^2 + [c_{L_{RF}} \cdot u(L_{RF})]^2 + [c_T \cdot u(T)]^2 + [u_{slm}(L_i)]^2} \quad [\text{dB}] \quad (4.94)$$

Si calculamos cada uno de los nuevos productos individuales que la forman, teniendo en cuenta los valores de las igualdades 4.90, 4.91, 4.92 y 4.93, obtendremos las expresiones 4.95 y 4.96.

$$c_{L_2} \cdot u(L_2) = \frac{-10^{L_2/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \cdot u_{rep}(L_2) \quad [\text{dB}] \quad (4.95)$$

$$c_{L_{RF}} \cdot u(L_{RF}) = \frac{10^{L_{RF}/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \cdot u_{rep}(L_{RF}) \quad [\text{dB}] \quad (4.96)$$

Sustituyendo en la ecuación 4.94 cada uno de los productos que la forman, obtendremos la expresión 4.97.

$$u_c^2(D_{nT}) = u_{rep}^2(L_1) + \left(\frac{-10^{L_2/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \right)^2 \cdot u_{rep}^2(L_2) + \left(\frac{10^{L_{RF}/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \right)^2 \cdot u_{rep}^2(L_{RF}) + \frac{100 \cdot [u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)]}{(\ln 10)^2 \cdot T^2} + 1 =$$

$$\begin{aligned}
&= u_{rep}^2(L_1) + \frac{10^{0,2 \cdot L_2}}{10^{0,2 \cdot L_2} + 10^{0,2 \cdot L_{RF}} - 2 \cdot 10^{0,1 \cdot (L_2 + L_{RF})}} \cdot u_{rep}^2(L_2) + \\
&+ \frac{10^{0,2 \cdot L_{RF}}}{10^{0,2 \cdot L_2} + 10^{0,2 \cdot L_{RF}} - 2 \cdot 10^{0,1 \cdot (L_2 + L_{RF})}} \cdot u_{rep}^2(L_{RF}) + \\
&+ \frac{100 \cdot [u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)]}{(\ln 10)^2 \cdot T^2} + 1
\end{aligned} \tag{4.97}$$

Sacando denominador común, la expresión final de la incertidumbre típica combinada, en [dB], vendrá dada por la ecuación 4.98.

$$u_c(D_{nT}) = \sqrt{u_{rep}^2(L_1) + \frac{10^{0,2 \cdot L_2} \cdot u_{rep}^2(L_2) + 10^{0,2 \cdot L_{RF}} \cdot u_{rep}^2(L_{RF})}{10^{0,2 \cdot L_2} + 10^{0,2 \cdot L_{RF}} - 2 \cdot 10^{0,1 \cdot (L_2 + L_{RF})}} + \frac{100 \cdot [u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)]}{(\ln 10)^2 \cdot T^2} + 1} \tag{4.98}$$

Y para finalizar, suponiendo una distribución normal y un factor de cobertura igual a 2, la incertidumbre expandida vendrá dada por la ecuación 4.99.

$$U = k \cdot u_c(D_{nT}) \text{ [dB]} \tag{4.99}$$

siendo el valor de la incertidumbre típica combinada el obtenido en la expresión 4.98.

4.5.8. Profundización del caso particular: Análisis exhaustivo del ruido de fondo

Cuando la medida de L_2 se ve afectada por L_{RF} , existe la posibilidad de hilar más fino aún en al análisis de la estimación de incertidumbre.

Siguiendo la orientación propuesta por el proyecto [41], el nivel medio de presión sonora calculado en el recinto receptor en ausencia del ruido de fondo, L_2' [dB] (el cual fue definido en la expresión 4.78), puede reescribirse tal y como muestra la igualdad 4.100.

$$L_2' = 10 \cdot \log \left\{ \left(10^{L_2/10} + 10^{L_{RF}/10} \right) - 10^{L_{RF}/10} \right\} \tag{4.100}$$

donde para cada una de las 16 frecuencias de interés, el nivel medio de presión sonora que se obtiene de medir niveles en el recinto receptor en presencia de ruido de fondo (que en la ecuación 4.78 se definió como L_2 [dB]) ahora se redefine como una combinación de:

- L_2' [dB], que representa el nivel medio de presión sonora real existente en el recinto receptor en ausencia de ruido de fondo. Dicho nivel no puede ser medido ni calculado.
- L_{RF}' [dB], que representa el nivel medio de ruido de fondo que se registra durante la medida del nivel de presión sonora L_2 en el recinto receptor. Dicho nivel tampoco puede ser medido ni calculado.

La referencia [41] considera que el ruido de fondo usado para corregir (al que denomina L_{RF} y es idéntico al de la expresión 4.78), no tiene por qué ser el mismo ruido que estaba presente cuando se midió el nivel de presión sonora en el recinto receptor (al que denomina como L_{RF}').

Por lo tanto, siguiendo con la pauta de análisis del proyecto, el modelo matemático de la diferencia de niveles estandarizada (D_{nT}) para esta nueva orientación puede expresarse mediante la ecuación 4.101.

$$D_{nT} \text{ [dB]} = L_1 - 10 \cdot \log \left\{ \left(10^{L_2/10} + 10^{L_{RF}'/10} \right) - 10^{L_{RF}/10} \right\} + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \tag{4.101}$$

Posteriormente, habrá que obtener los diferentes coeficientes de sensibilidad que relacionan las magnitudes de entrada con la magnitud de salida, que junto con la incertidumbre asociada a L_{RF} y L_{RF}' , permiten calcular la incertidumbre típica combinada. Ambas operaciones pueden consultarse en el Anexo 2 (ecuaciones A2.10 y A2.11), cuyo resultado viene dado por las expresiones 4.102 y 4.103.

$$c_{L_{RF}} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial L_{RF}} = \dots = \frac{10^{L_{RF}/10}}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \quad [*] \quad (4.102)$$

$$c_{L_{RF}'} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial L_{RF}'} = \dots = \frac{-10^{L_{RF}'/10}}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \quad [*] \quad (4.103)$$

Asumiendo que la diferencia entre L_{RF} [dB] y L_{RF}' [dB] es mínima (si se realizan las dos medidas próximas en el tiempo), podremos aproximar las expresiones 4.102 y 4.103, a las igualdades 4.104 y 4.105, respectivamente.

$$c_{L_{RF}} = \frac{10^{L_{RF}/10}}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \approx \frac{10^{L_{RF}/10}}{10^{L_2''/10}} = 10^{0,1 \cdot (L_{RF} - L_2'')} \quad [*] \quad (4.104)$$

$$c_{L_{RF}'} = \frac{-10^{L_{RF}'/10}}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \approx -\frac{10^{L_{RF}'/10}}{10^{L_2''/10}} = -10^{0,1 \cdot (L_{RF}' - L_2'')} \quad [*] \quad (4.105)$$

Por lo tanto, desdoblando el ruido de fondo en dos componentes, la *incertidumbre típica combinada*, vendrá dada por la ecuación 4.106.

$$u_c^2(D_{nT}) = [c_{L_1} \cdot u(L_1)]^2 + [c_{L_2} \cdot u(L_2)]^2 + [c_{L_{RF}} \cdot u(L_{RF})]^2 + [c_{L_{RF}'} \cdot u(L_{RF}')]^2 + [c_T \cdot u(T)]^2 + [u_{slm}(L_i)]^2 \quad \text{[dB]} \quad (4.106)$$

Considerando nuevamente que la diferencia entre L_{RF} y L_{RF}' es mínima (si se realizan las dos medidas próximas en el tiempo), ambos coeficientes de sensibilidad e incertidumbre típica serán similares, por lo que pueden realizarse las aproximaciones propuestas en las ecuaciones 4.107 y 4.108.

$$c_{L_{RF}} = c_{L_{RF}'} \quad [*] \quad (4.107)$$

$$u(L_{RF}) = u(L_{RF}') \quad \text{[dB]} \quad (4.108)$$

Tal y como se vio en el apartado anterior, la incertidumbre típica asociada a L_{RF} vendrá dada por la expresión 4.91 (que por comodidad, se repite aquí renombrada como 4.109),

$$u(L_{RF}) = \sqrt{u_{rep}^2(L_{RF})} = u_{rep}(L_{RF}) \quad \text{[dB]} \quad (4.109)$$

Si se sustituye el valor de la incertidumbre típica debido a la repetibilidad, $u_{rep}(L_{RF})$, se obtiene que la incertidumbre típica asociada a L_{RF} puede definirse mediante la igualdad 4.110.

$$u(L_{RF}) = u_{rep}(L_{RF}) = \sqrt{u_{rep}^2(P_{RF}^2) \cdot c_{P_{RF}^2}^2} \quad [*] \quad (4.110)$$

donde $u_{rep}(P_{RF}^2)$ es la incertidumbre de P_{RF}^2 debida a la repetibilidad (expresión 4.84, que por comodidad se repite aquí renombrada como 4.111) y $c_{P_{RF}^2}$ el coeficiente de sensibilidad (igualdad 4.112) que relaciona la presión media con el nivel medio de presión sonora, cuyo desarrollo matemático puede consultarse en el Anexo 2 (ecuación A2.12).

$$u_{rep}(P_{RF}^2) = \frac{s(P_{RF}^2)}{\sqrt{n}} \quad [\text{Pa}]^2 \quad (4.111)$$

$$c_{P_{RF}^2} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial P_{RF}^2} = \dots = \frac{10 \cdot \left(10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)} \right)}{\left(10^{\log\left(\frac{P_2^2}{P_0^2}\right)} + 10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)} \right) - 10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{1}{P_{RF}^2} \quad [\text{Pa}]^2 \quad (4.112)$$

Realizando esta consideración, la *incertidumbre típica combinada*, puede aproximarse a la expresión 4.113.

$$u_c^2(D_{nT}) = [c_{L_1} \cdot u(L_1)]^2 + [c_{L_2} \cdot u(L_2)]^2 + 2 \cdot [c_{L_{RF}} \cdot u(L_{RF})]^2 + [c_T \cdot u(T)]^2 + [u_{slm}(L_i)]^2 \quad [\text{dB}] \quad (4.113)$$

Si se calcula el nuevo producto individual que la forma, teniendo en cuenta los valores de las igualdades 4.104 y 4.110, se obtiene la expresión 4.114.

$$[c_{L_{RF}} \cdot u(L_{RF})]^2 = c_{L_{RF}}^2 \cdot u^2(L_{RF}) = 10^{0,2 \cdot (L_{RF} - L_2)} \cdot u^2(L_{RF}) \quad [*] \quad (4.114)$$

Sustituyendo en la ecuación 4.113 cada uno de los productos que la forman, obtendremos la expresión 4.115.

$$\begin{aligned} u_c^2(D_{nT}) &= u_{rep}^2(L_1) + \left(\frac{-10^{L_2/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \right)^2 \cdot u_{rep}^2(L_2) + \\ &+ 2 \cdot 10^{0,2 \cdot (L_{RF} - L_2)} \cdot u_{rep}^2(L_{RF}) + \frac{100 \cdot [u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)]}{(\ln 10)^2 \cdot T^2} + 1 = \\ &= u_{rep}^2(L_1) + \left(\frac{-10^{L_2/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \right)^2 \cdot u_{rep}^2(L_2) + \\ &+ 2 \cdot \left(\frac{10^{L_{RF}/10}}{10^{L_2/10}} \right)^2 \cdot u_{rep}^2(L_{RF}) + \frac{100 \cdot [u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)]}{(\ln 10)^2 \cdot T^2} + 1 \end{aligned} \quad (4.115)$$

Y teniendo en cuenta de nuevo, que la orientación propuesta por la referencia [41] supone que L_2 se desdoble en una combinación de L_2' y L_{RF}' , la ecuación 4.115 se puede reescribir como muestra la igualdad 4.116.

$$\begin{aligned} u_c^2(D_{nT}) &= u_{rep}^2(L_1) + \left(\frac{-10^{L_2/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \right)^2 \cdot u_{rep}^2(L_2) + \\ &+ 2 \cdot \left(\frac{10^{L_{RF}/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}'/10}} \right)^2 \cdot u_{rep}^2(L_{RF}') + \frac{100 \cdot [u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)]}{(\ln 10)^2 \cdot T^2} + 1 \end{aligned} \quad [\text{dB}] \quad (4.116)$$

Y por otro lado, sabiendo que $L_{RF} = L_{RF}'$ si se realizan las dos medidas próximas en el tiempo, podremos volver a reescribir la expresión de la incertidumbre típica combinada como la ecuación 4.117.

$$u_c^2(D_{nT}) = u_{rep}^2(L_1) + \left(\frac{-10^{L_2/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \right)^2 \cdot u_{rep}^2(L_2) + \quad [dB] \quad (4.117)$$

$$+ 2 \cdot \left(\frac{10^{L_{RF}/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \right)^2 \cdot u_{rep}^2(L_{RF}) + \frac{100 \cdot [u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)]}{(\ln 10)^2 \cdot T^2} + 1$$

Sacando denominador común, la expresión final de la incertidumbre típica combinada, en [dB], vendrá dada por la ecuación 4.118.

$$u_c(D_{nT}) = \sqrt{u_{rep}^2(L_1) + \frac{10^{0,2 \cdot L_2} \cdot u_{rep}^2(L_2) + 2 \cdot 10^{0,2 \cdot L_{RF}} \cdot u_{rep}^2(L_{RF})}{10^{0,2 \cdot L_2} + 10^{0,2 \cdot L_{RF}} - 2 \cdot 10^{0,1 \cdot (L_2 + L_{RF})}} + \frac{100 \cdot [u_{rep}^2(T) + u_{res}^2(T)]}{(\ln 10)^2 \cdot T^2} + 1} \quad (4.118)$$

(incertidumbre típica combinada, que como era de esperar, arroja un resultado diferente al de la expresión 4.98, ya que en este caso se están teniendo en cuenta dos ruidos de fondo distintos, bajo la asunción de proximidad en el tiempo de ambos niveles de ruido de fondo)

Y para finalizar, suponiendo nuevamente una distribución normal y un factor de cobertura igual a 2, la incertidumbre expandida vendrá dada por la ecuación 4.119.

$$U = k \cdot u_c(D_{nT}) \quad [dB] \quad (4.119)$$

siendo el valor de la incertidumbre típica combinada el obtenido en la expresión 4.118.

- ✓ Como ya se introdujo a mitad del capítulo, este estudio de la incertidumbre de medida para la *diferencia de niveles estandarizada* (D_{nT}), también puede hacerse con el resto de índices, como es la *diferencia de niveles normalizada* (D_n) o el *índice de reducción sonora aparente* (R'). Si realizásemos los cálculos pertinentes, lo que ocurriría es que la incertidumbre típica debido a los diferentes niveles de presión sonora medidos sería la misma para las 3 expresiones (4.42, 4.43 y 4.44), de manera que lo único que cambiaría sería la incertidumbre aportada por el término independiente que acompaña a la *diferencia de niveles* y que define cada índice.

4.5.9. Conclusión

Evaluar la incertidumbre de medida considerando que el ensayo se ve perturbado por el ruido de fondo enriquece el análisis de la misma, pero en contrapartida, hace más complejos los cálculos. Sin embargo, siempre que $L_2 - L_{RF} < 10$ [dB] será necesario corregir L_2 por ruido de fondo y considerar dicho ruido en la estimación de la incertidumbre de medida, aumentando el valor de dicha incertidumbre.

4.5.10. Evaluación de la incertidumbre de medida para una magnitud global

El método de comparación de la norma UNE – EN ISO 717 – 1: 1997 empleado para la obtención de las magnitudes globales no es un método lineal o expresable funcionalmente. Esta circunstancia hace que no sea posible aplicar el *método de propagación de incertidumbres* visto hasta ahora para estimar la incertidumbre de medida de una magnitud global. Como solución a este inconveniente, se empleará el *método de Montecarlo*, cuyo procedimiento general, en dos pasos, se detalla a continuación:

1. En un primer paso, vamos a beneficiarnos de la definición de varianza del mismo modo que se hizo en el Capítulo 3. Dicho estadístico nos va a servir para crear 100000 espectros a partir de una curva de medida.

La manera de hacerlo será aplicando una distribución normal al valor de aislamiento de cada una de las frecuencias centrales (Figura 4.2), obteniendo así 100000 valores aleatorios para cada una de ellas, y en consecuencia, 100000 espectros diferentes para compararlos con la curva de referencia. El valor de varianza aplicado a cada una de las distribuciones normales será diferente para cada una de las frecuencias centrales. Concretamente, el valor de varianza para cada frecuencia, se corresponderá con el valor de incertidumbre típica combinada al cuadrado obtenido para la misma.

De esta forma, para cada valor de aislamiento que depende de la frecuencia, $D_{nT}(f)$, generamos una distribución cuya media será un determinado valor, $D_{nTm}(f)$, que se correspondería con el valor calculado en el ensayo, al que asociaremos una determinada varianza, de valor $u_c^2(f)$, mediante la que se obtendrán diferentes espectros entorno al formado por los 16 valores de $D_{nTm}(f)$. Seguidamente, realizamos el “método de comparación” entre la curva de referencia y cada uno de ellos, obteniendo así el valor global de aislamiento (al que denominaremos como $D_{nT,w}$) para cada espectro. En total obtendremos 100000 valores de $D_{nT,w}$, uno por cada espectro generado.

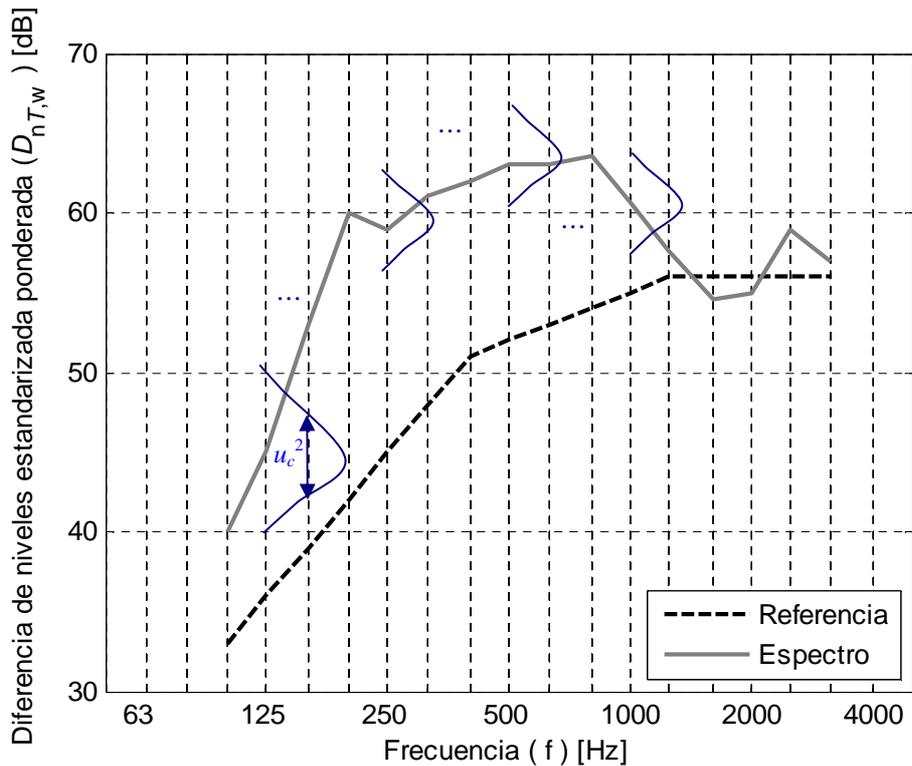


Figura 4.2 – Distribuciones normales entorno a cada valor de aislamiento para cada frecuencia central.

2. A partir de los 100000 valores de $D_{nT,w}$, se obtiene el valor global de aislamiento “medio” (al que denominaremos como $D_{nT,w \text{ medio}}$) y se calcula la varianza asociada al mismo. Ese valor de varianza obtenido será igual a la incertidumbre típica combinada al cuadrado de la magnitud global, $u_c^2_{\text{global}}$.

Por lo tanto, suponiendo una distribución normal y un factor de cobertura igual a 2, la incertidumbre de medida expandida para la magnitud global, U_{global} , vendrá dada por la expresión 4.120.

$$U_{global} = k \cdot u_{c\ global} \quad [\text{dB}] \quad (4.120)$$

A partir de este resultado, ya es posible estimar el valor de aislamiento global junto con su incertidumbre de medida asociada, $D_{nT,w\ inc}$, expresándolo de la forma que muestra la igualdad 4.121.

$$D_{nT,w\ inc} = D_{nT,w} \pm U_{global} \quad [\text{dB}] \quad (4.121)$$

4.6. EJEMPLOS DE CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE EN MEDIDAS DE AISLAMIENTO

4.6.1. Primer escenario

Antes de comenzar a efectuar cálculos, lo primero que hay que hacer es analizar la situación de partida del escenario de medida. Si observamos la Figura 4.3, queda patente que la medida del nivel de presión sonora en el recinto receptor, L_2 , no se ve afectada por el ruido de fondo (es decir, que $L_2 - L_{RF} \geq 10$ [dB]) y por lo tanto no es necesario corregir el nivel L_2 . Así, para calcular el índice D_{nT} se utilizará la ecuación 4.43 y para estimar su incertidumbre de medida correspondiente se empleará la expresión 4.75.

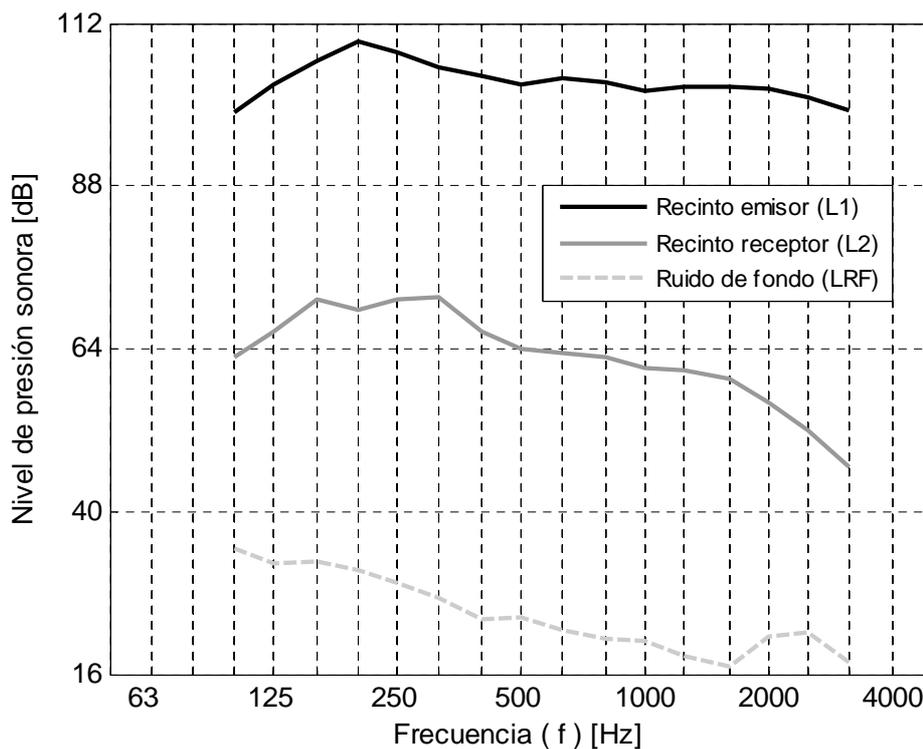


Figura 4.3 – Escenario de medida del primer ejemplo.

Supongamos una serie de niveles de presión sonora y tiempos de reverberación, medidos durante un ensayo, que se muestran en las Tablas A4.1, A4.2 y A4.4 del Anexo 4, y que permiten obtener los valores de aislamiento para cada una de las frecuencias medidas de la Tabla 4.2 (haciendo uso de la expresión 4.43) e ilustrar el espectro de la Figura 4.4.

f [Hz]	D_{nT} [dB]
50	-
63	-
80	-
100	40,9
125	41,2
160	39,4
200	43,7
250	40,4
315	37,5
400	41,3
500	43
630	44,9
800	44,8
1000	45,3
1250	46,2
1600	47,4
2000	51
2500	53,5
3150	57,1
4000	-
5000	-

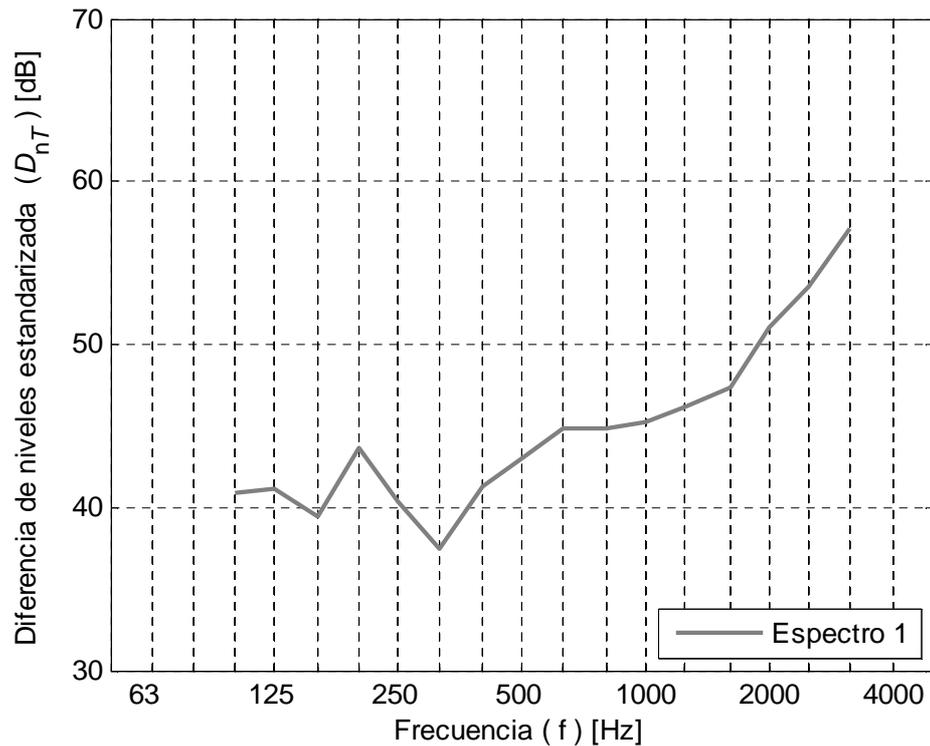


Tabla 4.2

Figura 4.4 – Espectro resultante representativo de los valores de D_{nT} obtenidos.

- ✓ Una vez obtenido el valor de aislamiento a ruido aéreo entre locales (en este caso el índice D_{nT}), nos disponemos a estimar su incertidumbre de medida. Para ello emplearemos el método y la formulación desarrollados a lo largo del punto 4.5.

Para obtener los diferentes valores de incertidumbre de medida que conforman la ecuación 4.75 y que se van a exponer en las Tablas 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6, también se hace uso de los datos que figuran en las Tablas A4.1, A4.2 y A4.4 del Anexo 4. De cara a los cálculos, se utilizarán todos los decimales posibles para una estimación con la mayor exactitud. Sin embargo, con la intención de facilitar la lectura de las tablas, se empleará un decimal en la presentación de los valores dados en [dB], dos decimales en la presentación de los valores dados en [s] o [s⁻¹] y tres decimales en la presentación de los valores dados en [Pa²] o [Pa⁻²]. De esta forma:

- En relación al nivel de presión sonora medido en el recinto emisor (L_1)

f [Hz]	P_1^2 [Pa ²]	$s(P_1^2)$ [Pa ²]	$u_{rep}(P_1^2)$ [Pa ²]	$c_{P_1^2}$ [Pa ⁻²]	$u_{rep}(L_1)$ [dB]
100	3,144	1,209	0,382	1,381	0,5
125	8,076	3,393	1,073	0,538	0,6
160	17,305	5,064	1,601	0,251	0,4
200	34,638	13,699	4,332	0,125	0,5
250	23,742	8,139	2,574	0,183	0,5
315	14,323	5,245	1,658	0,303	0,5
400	10,487	2,428	0,768	0,414	0,3
500	8,243	1,446	0,457	0,527	0,2
630	10,140	2,188	0,692	0,428	0,3
800	8,627	1,261	0,399	0,503	0,2

1000	6,550	0,619	0,196	0,663	0,1
1250	7,682	0,502	0,159	0,565	0,1
1600	7,310	0,912	0,288	0,594	0,2
2000	6,998	0,801	0,253	0,621	0,2
2500	5,133	0,489	0,155	0,846	0,1
3150	3,381	0,268	0,085	1,284	0,1

Tabla 4.3 – Valores referidos al recinto emisor para cada una de las frecuencias medidas.

- En relación al nivel de presión sonora medido en el recinto receptor (L_2)

f [Hz]	P_2^2 [Pa ²]	$s(P_2^2)$ [Pa ²]	$u_{rep}(P_2^2)$ [Pa ²]	$c_{P_2^2}$ [Pa ⁻²]	$u_{rep}(L_2)$ [dB]
100	$7,627 \cdot 10^{-4}$	$3,312 \cdot 10^{-4}$	$1,047 \cdot 10^{-4}$	- 5694,041	0,6
125	$1,816 \cdot 10^{-3}$	$1,015 \cdot 10^{-3}$	$3,21 \cdot 10^{-4}$	- 2391,153	0,8
160	$5,272 \cdot 10^{-3}$	$1,841 \cdot 10^{-3}$	$5,82 \cdot 10^{-4}$	823,8	0,5
200	$3,842 \cdot 10^{-3}$	$8,154 \cdot 10^{-4}$	$2,579 \cdot 10^{-4}$	- 1130,269	0,3
250	$5,398 \cdot 10^{-3}$	$1,011 \cdot 10^{-3}$	$3,197 \cdot 10^{-4}$	-804,520	0,3
315	$5,731 \cdot 10^{-3}$	$1,766 \cdot 10^{-4}$	$5,586 \cdot 10^{-4}$	-757,739	0,4
400	$1,738 \cdot 10^{-3}$	$3,794 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	-2498,156	0,3
500	$1,026 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$4,174 \cdot 10^{-5}$	-4234,714	0,2
630	$8,684 \cdot 10^{-4}$	$1,897 \cdot 10^{-4}$	$5,999 \cdot 10^{-5}$	-5001,066	0,3
800	$7,665 \cdot 10^{-4}$	$8,576 \cdot 10^{-5}$	$2,712 \cdot 10^{-5}$	-5665,726	0,2
1000	$5,095 \cdot 10^{-4}$	$3,647 \cdot 10^{-5}$	$1,153 \cdot 10^{-5}$	-8524,763	0,1
1250	$4,964 \cdot 10^{-4}$	$4,132 \cdot 10^{-5}$	$1,307 \cdot 10^{-5}$	-8749,545	0,1
1600	$3,699 \cdot 10^{-4}$	$1,914 \cdot 10^{-5}$	$6,051 \cdot 10^{-6}$	-11740,793	0,1
2000	$1,576 \cdot 10^{-4}$	$6,008 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	-27551,164	0,1
2500	$6,261 \cdot 10^{-5}$	$2,245 \cdot 10^{-6}$	$7,098 \cdot 10^{-7}$	-69370,010	0
3150	$1,782 \cdot 10^{-5}$	$6,408 \cdot 10^{-7}$	$2,026 \cdot 10^{-7}$	-243709,411	0

Tabla 4.4 – Valores referidos al recinto receptor para cada una de las frecuencias medidas.

- ✓ Los valores de las casillas sombreadas en color gris no son estrictamente cero, pero el redondeo a un decimal del valor obtenido si resulta ser prácticamente cero, motivo por el cual dichos valores figuran como "0".

- En relación al tiempo de reverberación calculado en el recinto receptor (T)

f [Hz]	$u_{rep}(T)$ [s]	$u_{res}(T)$ [s]
100	0,17	$5,77 \cdot 10^{-3}$
125	0,15	$5,77 \cdot 10^{-3}$
160	0,12	$5,77 \cdot 10^{-3}$
200	0,11	$5,77 \cdot 10^{-3}$
250	0,10	$5,77 \cdot 10^{-3}$
315	0,08	$5,77 \cdot 10^{-3}$
400	0,07	$5,77 \cdot 10^{-3}$
500	0,07	$5,77 \cdot 10^{-3}$

630	0,06	$5,77 \cdot 10^{-3}$
800	0,06	$5,77 \cdot 10^{-3}$
1000	0,05	$5,77 \cdot 10^{-3}$
1250	0,05	$5,77 \cdot 10^{-3}$
1600	0,04	$5,77 \cdot 10^{-3}$
2000	0,04	$5,77 \cdot 10^{-3}$
2500	0,03	$5,77 \cdot 10^{-3}$
3150	0,03	$5,77 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4.5 – Valores referidos al recinto receptor para cada una de las frecuencias medidas.

Posteriormente, siguiendo la estructura lógica de la combinación de incertidumbres y coeficientes de la igualdad 4.75, junto con los resultados obtenidos en las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5, se puede definir la Tabla 4.6.

f [Hz]	$u(L_1)$ [dB]	c_{L_1} [°]	$u(L_2)$ [dB]	c_{L_2} [°]	$u(T)$ [s]	c_T [s ⁻¹]	$u_{stm}(L_i)$ [dB]
100	0,5	1	0,6	- 1	0,17	2,89	1
125	0,6	1	0,8	- 1	0,15	2,94	1
160	0,4	1	0,5	- 1	0,12	3,24	1
200	0,5	1	0,3	- 1	0,11	3,31	1
250	0,5	1	0,3	- 1	0,10	3,46	1
315	0,5	1	0,4	- 1	0,08	3,88	1
400	0,3	1	0,3	- 1	0,07	3,92	1
500	0,2	1	0,2	- 1	0,07	3,51	1
630	0,3	1	0,3	- 1	0,06	3,27	1
800	0,2	1	0,2	- 1	0,06	3,22	1
1000	0,1	1	0,1	- 1	0,05	3,30	1
1250	0,1	1	0,1	- 1	0,05	3,19	1
1600	0,2	1	0,1	- 1	0,04	3,12	1
2000	0,2	1	0,1	- 1	0,04	3,08	1
2500	0,1	1	0	- 1	0,03	3,16	1
3150	0,1	1	0	- 1	0,03	3,19	1

Tabla 4.6 – Valores referidos al recinto receptor y emisor para cada una de las frecuencias medidas.

Por último, la incertidumbre típica combinada y expandida, vendrán dadas por la Tabla 4.7.

f [Hz]	$u_c(D_{nT})$ [dB]	U [dB]
100	1,4	2,7
125	1,5	2,9
160	1,2	2,5
200	1,2	2,5
250	1,2	2,4
315	1,2	2,5
400	1,1	2,3
500	1,1	2,1
630	1,1	2,2

800	1	2,1
1000	1	2,1
1250	1	2
1600	1	2
2000	1	2
2500	1	2
3150	1	2

Tabla 4.7 – Valores de incertidumbre típica combinada y expandida para cada una de las frecuencias medidas.

- ✓ Una vez obtenido el valor de la incertidumbre típica combinada, ya es posible estimar el valor de la incertidumbre de medida de la magnitud global ($D_{nT,w inc}$) de la manera descrita en el apartado 4.5.10, cuya situación de partida viene definida por la Figura 4.5.

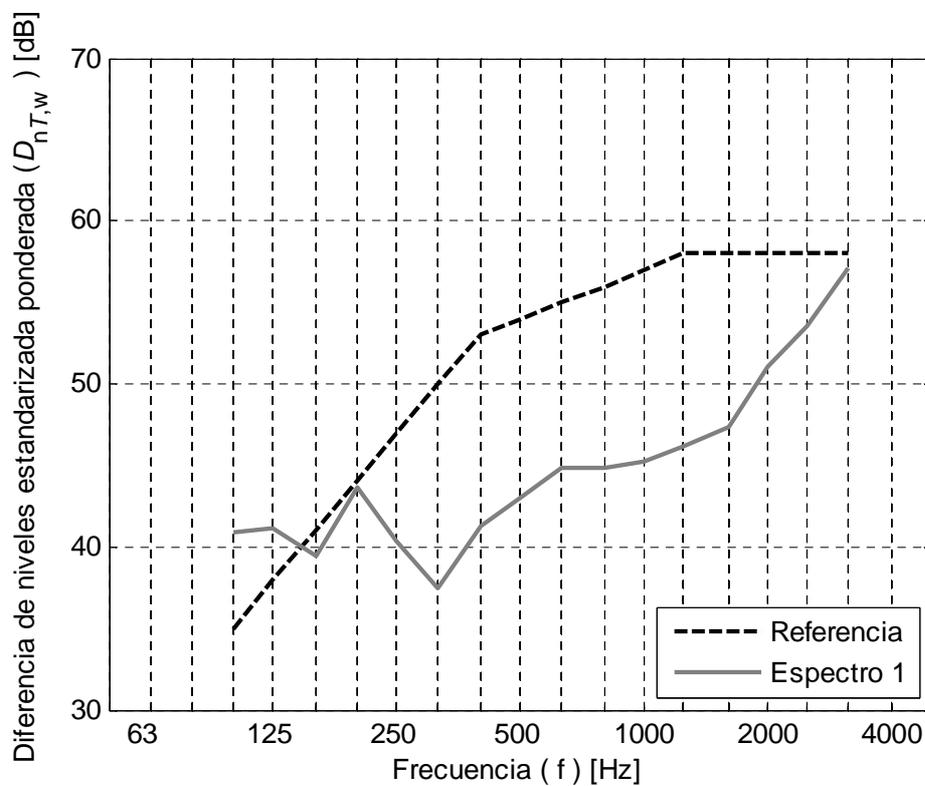


Figura 4.5 – Situación de partida antes de efectuar Montecarlo.

Para ello, se emplea el método de Montecarlo, obteniéndose el histograma de la Figura 4.6 y los resultados de las expresiones 4.122 y 4.123.

$$D_{nT,w medio} = 46,1 \text{ [dB]} \quad (4.122)$$

$$u_c^2 global = 0,2 \text{ [dB]} \quad (4.123)$$

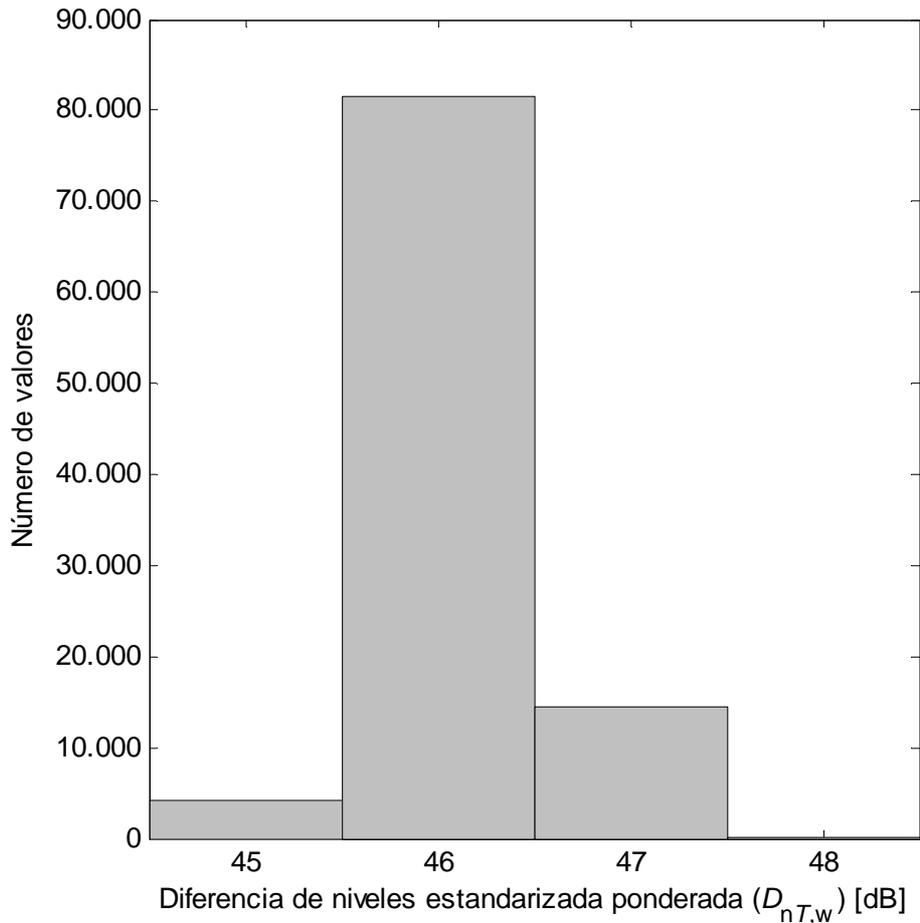


Figura 4.6 – Histograma obtenido tras efectuar Montecarlo.

Por consiguiente, suponiendo una distribución normal y un factor de cobertura igual a 2, la incertidumbre de medida expandida para la magnitud global, U_{global} , vendrá dada por la expresión 4.124.

$$U_{global} = 2 \cdot \sqrt{0,2} = 0,9 \text{ [dB]} \quad (4.124)$$

A partir de este resultado, ya es posible estimar el valor de aislamiento global junto con su incertidumbre de medida asociada, $D_{nT,w inc}$, expresándolo de la forma que muestra la igualdad 4.125.

$$D_{nT,w inc} = D_{nT,w} \pm U_{global} = 46 \pm 0,9 \text{ [dB]} \quad (4.125)$$

4.6.2. Segundo escenario

Antes de comenzar a efectuar cálculos, de nuevo nos disponemos a analizar la situación de partida. Si observamos la Tabla 4.8 y la Figura 4.7, queda patente que en algunas frecuencias (todas salvo la frecuencia de 250 [Hz], 315 [Hz], 400 [Hz], 1600 [Hz], 2000 [Hz], 2500 [Hz] y 3150 [Hz]) la medida del nivel de presión sonora en el recinto receptor, L_2 , se ve afectada por el ruido de fondo (es decir, que $L_2 - L_{RF} < 10$ [dB]), de manera que para calcular el índice D_{nT} para esas frecuencias se utilizarán las ecuaciones 4.79 ó 4.101 (elegir una u otra dependerá de si se desea realizar o no un análisis exhaustivo del ruido de fondo que afecta al ensayo) y para estimar la incertidumbre de medida del D_{nT} se emplearán las expresiones 4.98 o 4.118, respectivamente. Para el resto de frecuencias que no se vean afectadas por el ruido de fondo, el índice D_{nT} se calculará con la ecuación 4.43 (la misma del ejemplo 1) y se estimará su incertidumbre de medida mediante la expresión 4.75 (la ya utilizada para el primer espectro).

f [Hz]	Promedio L_2 [dB]	Promedio L_{RF} [dB]	Diferencia [dB]
100	64,3	57,9	6,4
125	65,1	57,8	7,3
160	71,3	63,1	8,2
200	69,2	62,4	6,7
250	72,4	56,6	15,8
315	71,2	54,4	16,8
400	67,7	55,9	11,8
500	64,3	56,6	7,7
630	63,9	55,9	8,0
800	62,8	56,6	6,3
1000	61,4	55,1	6,3
1250	60,8	52,8	8,1
1600	59,6	48,5	11,1
2000	56,0	43,8	12,2
2500	51,8	34,2	17,6
3150	46,3	17,2	29,1

Tabla 4.8 – Análisis del ruido de fondo que afecta a la medida de L_2 .

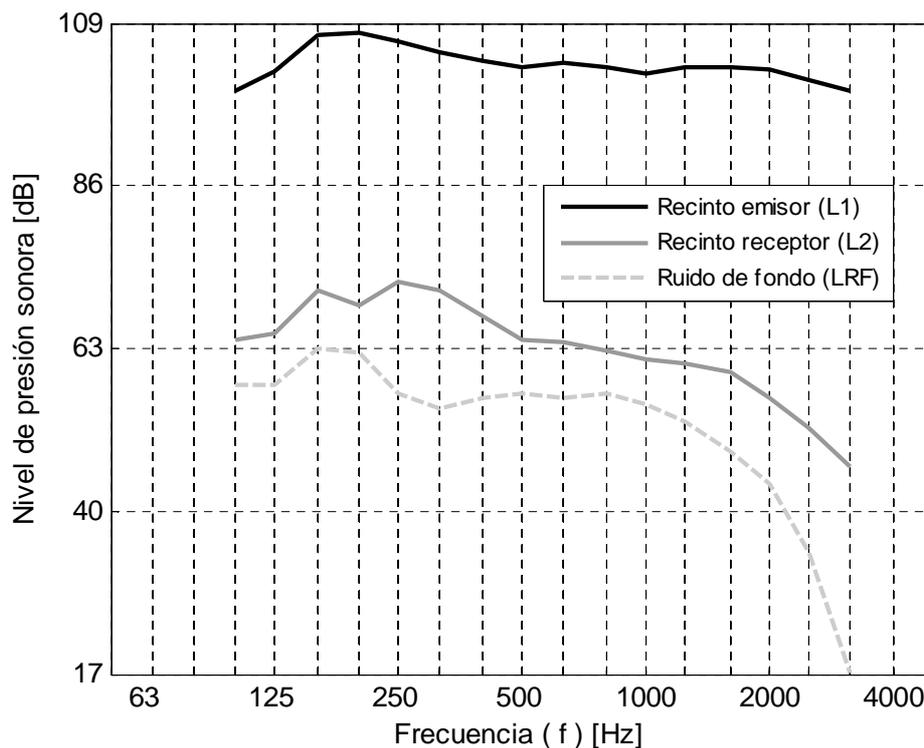


Figura 4.7 – Escenario de medida del segundo ejemplo.

Para este segundo ejemplo, se ha decidido emplear en los cálculos ambas expresiones (4.98 y 4.118) con el fin de analizar desde dos puntos de vista distintos qué cantidad de incertidumbre de medida aporta la presencia del ruido de fondo al ensayo sobre las frecuencias afectadas por el mismo.

Por lo tanto, para esas frecuencias afectadas por el ruido de fondo, se realizará una primera estimación de la incertidumbre con la ecuación 4.98 y un segundo análisis de la misma con la igualdad 4.118. Sin embargo, dado que L_2'' y L_{RF}' no pueden ser medidos ni calculados (como ya se explicó en el apartado 4.5.8), el cálculo del índice D_{nT} resultará ser el mismo para ambas expresiones, a pesar de que la estimación de la incertidumbre sea diferente.

De este modo, suponiendo una serie de niveles de presión sonora y tiempos de reverberación, medidos durante un ensayo, que se muestran en las Tablas A4.5, A4.6, A4.7 y A4.8, se pueden obtener los resultados de la Tabla 4.9 (haciendo uso de la expresión 4.79 ó 4.101 para las frecuencias afectadas por el ruido de fondo y de la ecuación 4.43 para el resto) e ilustrar el espectro de la Figura 4.8.

f [Hz]	D_{nT} [dB]
50	-
63	-
80	-
100	41,1
125	42,9
160	41,4
200	43,5
250	37,9
315	37,1
400	39,1
500	42,8
630	44,4
800	45,3
1000	46
1250	46,8
1600	47,3
2000	50,8
2500	53,4
3150	57
4000	-
5000	-

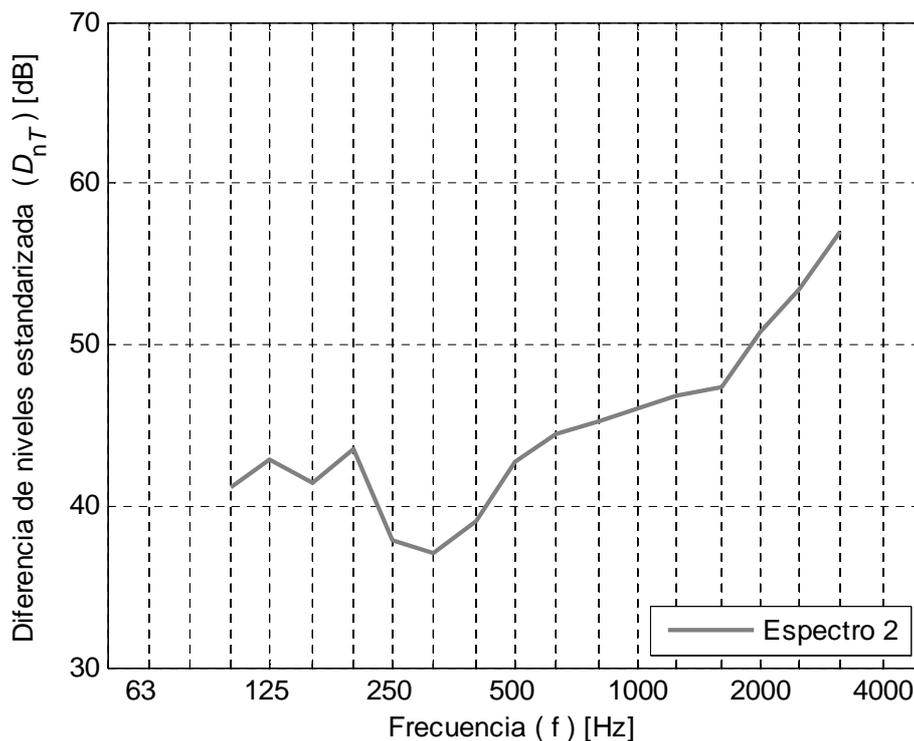


Tabla 4.9

Figura 4.8 – Espectro resultante representativo de los valores de D_{nT} obtenidos para ambas expresiones.

- ✓ Una vez obtenido el valor de aislamiento a ruido aéreo entre locales mediante el índice D_{nT} , nos disponemos a estimar su incertidumbre de medida. Para ello emplearemos una sistemática de cálculo similar a la del primer escenario, pero en este caso teniendo en cuenta las particularidades de la presencia del ruido de fondo durante la medida.

Para obtener los diferentes valores de incertidumbre de medida que conforman ambas ecuaciones (4.98 ó 4.118 para las frecuencias afectadas por el ruido de fondo y 4.75 para el resto) y que se van a exponer en las Tablas 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13, también se hace uso de los datos que figuran en las Tablas A4.5, A4.6, A4.7 y A4.8 del Anexo 4. De esta forma, se obtiene:

- En relación al nivel de presión sonora medido en el recinto emisor (L_1)

f [Hz]	P_1^2 [Pa ²]	$s(P_1^2)$ [Pa ²]	$u_{rep}(P_1^2)$ [Pa ²]	$c_{P_1^2}$ [Pa ⁻²]	$u_{rep}(L_1)$ [dB]
100	3,467	1,468	0,464	1,253	0,6
125	6,842	2,709	0,857	0,635	0,5
160	21,536	7,282	2,303	0,202	0,5
200	22,456	7,818	2,472	0,193	0,5
250	17,992	3,553	1,124	0,241	0,3
315	12,478	3,324	1,051	0,348	0,4
400	9,464	2,419	0,765	0,459	0,4
500	7,707	1,269	0,401	0,563	0,2
630	8,641	1,259	0,398	0,503	0,2
800	7,592	1,077	0,340	0,572	0,2
1000	6,072	0,679	0,215	0,715	0,2
1250	7,512	0,880	0,278	0,578	0,2
1600	7,416	0,912	0,288	0,586	0,2
2000	7,247	0,689	0,218	0,599	0,1
2500	5,086	0,381	0,120	0,854	0,1
3150	3,396	0,309	0,098	1,279	0,1

Tabla 4.10 – Valores referidos al recinto emisor para cada una de las frecuencias medidas.

- En relación al nivel de presión sonora medido en el recinto receptor (L_2)

f [Hz]	P_2^2 [Pa ²]	$s(P_2^2)$ [Pa ²]	$u_{rep}(P_2^2)$ [Pa ²]	$c_{P_2^2}$ [Pa ⁻²]	$u_{rep}(L_2)$ [dB]
100	$1,073 \cdot 10^{-3}$	$3,363 \cdot 10^{-4}$	$1,063 \cdot 10^{-4}$	-5252,138	0,6
125	$1,305 \cdot 10^{-3}$	$4,224 \cdot 10^{-4}$	$1,336 \cdot 10^{-4}$	-4167,782	0,6
160	$5,378 \cdot 10^{-3}$	$2,931 \cdot 10^{-3}$	$9,269 \cdot 10^{-4}$	-980,428	0,9
200	$3,303 \cdot 10^{-3}$	$9,025 \cdot 10^{-4}$	$2,854 \cdot 10^{-4}$	-1689,921	0,5
250	$6,983 \cdot 10^{-3}$	$1,671 \cdot 10^{-3}$	$5,284 \cdot 10^{-4}$	-621,888	0,3
315	$5,246 \cdot 10^{-3}$	$1,322 \cdot 10^{-3}$	$4,179 \cdot 10^{-4}$	-827,859	0,3
400	$2,348 \cdot 10^{-3}$	$4,683 \cdot 10^{-4}$	$1,481 \cdot 10^{-4}$	-1849,454	0,3
500	$1,085 \cdot 10^{-3}$	$1,113 \cdot 10^{-4}$	$3,519 \cdot 10^{-5}$	-5299,860	0,2
630	$9,782 \cdot 10^{-4}$	$1,100 \cdot 10^{-4}$	$3,478 \cdot 10^{-5}$	-5458,481	0,2
800	$7,690 \cdot 10^{-4}$	$8,158 \cdot 10^{-5}$	$2,580 \cdot 10^{-5}$	-7516,944	0,2
1000	$5,489 \cdot 10^{-4}$	$4,869 \cdot 10^{-5}$	$1,540 \cdot 10^{-5}$	-10629,399	0,2
1250	$4,857 \cdot 10^{-4}$	$2,688 \cdot 10^{-5}$	$8,502 \cdot 10^{-6}$	-10838,573	0,1
1600	$3,647 \cdot 10^{-4}$	$3,148 \cdot 10^{-5}$	$9,955 \cdot 10^{-6}$	-11908,087	0,1
2000	$1,581 \cdot 10^{-4}$	$8,646 \cdot 10^{-6}$	$2,734 \cdot 10^{-6}$	-27469,458	0,1
2500	$6,037 \cdot 10^{-5}$	$3,253 \cdot 10^{-6}$	$1,029 \cdot 10^{-6}$	-71936,462	0,1
3150	$1,691 \cdot 10^{-5}$	$9,221 \cdot 10^{-7}$	$2,916 \cdot 10^{-7}$	-256769,921	0,1

Tabla 4.11 – Valores referidos al recinto receptor para cada una de las frecuencias medidas.

- En relación al nivel de ruido de fondo medido en el recinto receptor (L_{RF})

f [Hz]	P_{RF}^2 [Pa ²]	$s(P_{RF}^2)$ [Pa ²]	$u_{rep}(P_{RF}^2)$ [Pa ²]	$c_{P_{RF}^2}$ [Pa ²]	$u_{rep}(L_{RF})$ [dB]
100	$2,466 \cdot 10^{-4}$	$3,886 \cdot 10^{-5}$	$1,943 \cdot 10^{-5}$	5252,138	0,1
125	$2,627 \cdot 10^{-4}$	$1,292 \cdot 10^{-4}$	$6,459 \cdot 10^{-5}$	4167,782	0,3
160	$9,483 \cdot 10^{-4}$	$4,908 \cdot 10^{-4}$	$2,454 \cdot 10^{-4}$	980,428	0,2
200	$7,331 \cdot 10^{-4}$	$2,361 \cdot 10^{-4}$	$1,180 \cdot 10^{-4}$	1689,921	0,2
250	-	-	-	-	-
315	-	-	-	-	-
400	-	-	-	-	-
500	$2,657 \cdot 10^{-4}$	$2,517 \cdot 10^{-4}$	$1,258 \cdot 10^{-4}$	5299,860	0,7
630	$1,825 \cdot 10^{-4}$	$1,087 \cdot 10^{-4}$	$5,434 \cdot 10^{-5}$	5458,481	0,3
800	$1,913 \cdot 10^{-4}$	$7,002 \cdot 10^{-5}$	$3,501 \cdot 10^{-5}$	7516,944	0,3
1000	$1,403 \cdot 10^{-4}$	$6,233 \cdot 10^{-5}$	$3,117 \cdot 10^{-5}$	10629,399	0,3
1250	$8,499 \cdot 10^{-5}$	$4,546 \cdot 10^{-5}$	$2,273 \cdot 10^{-5}$	10838,573	0,2
1600	-	-	-	-	-
2000	-	-	-	-	-
2500	-	-	-	-	-
3150	-	-	-	-	-

Tabla 4.12 – Valores referidos al recinto receptor para cada una de las frecuencias medidas.

- ✓ Los valores de las casillas sombreadas en color gris no han sido calculados, puesto que para ese conjunto de frecuencias, el ruido de fondo no afecta a la medida de L_2 y por lo tanto no es necesario hacer una corrección por ruido de fondo en las mismas.

- En relación al tiempo de reverberación calculado en el recinto receptor (T)

f [Hz]	$u_{rep}(T)$ [s]	$u_{res}(T)$ [s]
100	0,17	$5,77 \cdot 10^{-3}$
125	0,15	$5,77 \cdot 10^{-3}$
160	0,13	$5,77 \cdot 10^{-3}$
200	0,11	$5,77 \cdot 10^{-3}$
250	0,09	$5,77 \cdot 10^{-3}$
315	0,08	$5,77 \cdot 10^{-3}$
400	0,07	$5,77 \cdot 10^{-3}$
500	0,06	$5,77 \cdot 10^{-3}$
630	0,06	$5,77 \cdot 10^{-3}$
800	0,05	$5,77 \cdot 10^{-3}$
1000	0,05	$5,77 \cdot 10^{-3}$
1250	0,04	$5,77 \cdot 10^{-3}$
1600	0,04	$5,77 \cdot 10^{-3}$
2000	0,03	$5,77 \cdot 10^{-3}$
2500	0,03	$5,77 \cdot 10^{-3}$
3150	0,03	$5,77 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4.13 – Valores referidos al recinto receptor para cada una de las frecuencias medidas.

Posteriormente, siguiendo la estructura lógica de la combinación de incertidumbres y coeficientes de las igualdades 4.98 ó 4.118 para las frecuencias afectadas por el ruido de fondo y de la expresión 4.75 para el resto, junto con los resultados obtenidos en las Tablas 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13, se puede definir la Tabla 4.14.

f [Hz]	$u(L_1)$ [dB]	c_{L_1} [*]	$u(L_2)$ [dB]	c_{L_2} [*]	$u(L_{RF})$ [dB]	$c_{L_{RF}}$ [*]	$u(T)$ [s]	c_T [s ⁻¹]	$u_{slm}(L_i)$ [dB]
100	0,6	1	0,6	-1,3	0,1	0,3	0,17	2,79	1
125	0,5	1	0,6	-1,2	0,3	0,2	0,15	2,89	1
160	0,5	1	0,9	-1,2	0,2	0,2	0,13	2,95	1
200	0,5	1	0,5	-1,3	0,2	0,3	0,11	3,33	1
250	0,3	1	0,3	-1,0	-	-	0,09	3,66	1
315	0,4	1	0,3	-1,0	-	-	0,08	4,03	1
400	0,4	1	0,3	-1,0	-	-	0,07	4,27	1
500	0,2	1	0,2	-1,2	0,7	0,2	0,06	3,89	1
630	0,2	1	0,2	-1,2	0,3	0,2	0,06	3,34	1
800	0,2	1	0,2	-1,3	0,3	0,3	0,06	3,29	1
1000	0,2	1	0,2	-1,3	0,3	0,3	0,05	3,19	1
1250	0,2	1	0,1	-1,2	0,2	0,2	0,04	3,31	1
1600	0,2	1	0,1	-1,0	-	-	0,04	3,30	1
2000	0,1	1	0,1	-1,0	-	-	0,04	3,30	1
2500	0,1	1	0,1	-1,0	-	-	0,03	3,32	1
3150	0,1	1	0,1	-1,0	-	-	0,03	3,47	1

Tabla 4.14 – Valores referidos al recinto receptor y emisor para cada una de las frecuencias medidas.

Por último, la incertidumbre típica combinada y expandida para ambas aproximaciones, vendrán dadas por la Tabla 4.15.

f [Hz]	Incertidumbre con las expresiones 4.75 y 4.98		Incertidumbre con las expresiones 4.75 y 4.118	
	$u_c(D_{nT})$ [dB]	U [dB]	$u_c(D_{nT})$ [dB]	U [dB]
100	1,4	2,9	1,4	2,9
125	1,4	2,8	1,4	2,8
160	1,6	3,2	1,6	3,2
200	1,3	2,6	1,3	2,6
250	1,1	2,3	1,1	2,3
315	1,2	2,3	1,2	2,3
400	1,1	2,3	1,1	2,3
500	1,1	2,2	1,1	2,2
630	1,1	2,1	1,1	2,1
800	1,1	2,1	1,1	2,1
1000	1,1	2,1	1,1	2,1
1250	1,0	2,1	1,0	2,1
1600	1,0	2,1	1,0	2,1
2000	1,0	2,0	1,0	2,0
2500	1,0	2,0	1,0	2,0
3150	1,0	2,0	1,0	2,0

Tabla 4.15 – Valores de incertidumbre típica combinada y expandida para cada una de las frecuencias medidas.

- ✓ Es importante destacar que se han obtenido los mismos valores para ambas aproximaciones puesto que el resultado de las mismas se redondea a un único decimal. Sin embargo, en la hoja de cálculo desarrollada para la estimación de la incertidumbre, los siguientes decimales resultan ser distintos, quedando patente la diferencia entre emplear la expresión 4.98 ó 4.118.
- ✓ Una vez obtenido el valor de la incertidumbre típica combinada (el mismo para los dos análisis del ruido de fondo), ya es posible efectuar el método de Montecarlo para estimar el valor de la incertidumbre de medida de la magnitud global ($D_{nT,w inc}$) de la manera descrita en el apartado 4.5.10, cuya situación de partida viene definida por la Figura 4.9.

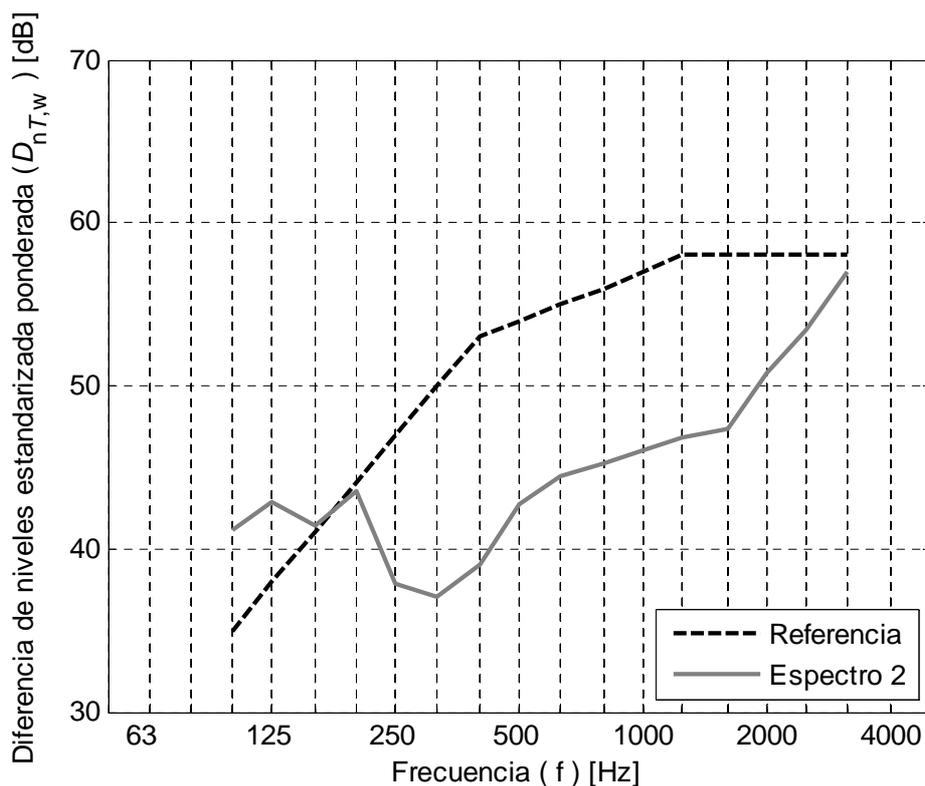


Figura 4.9 – Situación de partida antes de efectuar Montecarlo.

Para ello, se emplea el método de Montecarlo (el mismo para ambas aproximaciones, puesto que los cálculos han generado los mismos valores de D_{nT} y de incertidumbre), obteniéndose el histograma de la Figura 4.10 y los resultados de las expresiones 4.126 y 4.127.

$$D_{nT,w medio} = 45,8 \text{ [dB]} \quad (4.126)$$

$$u_c^2 global = 0,2 \text{ [dB]} \quad (4.127)$$

Por consiguiente, suponiendo una distribución normal y un factor de cobertura igual a 2, la incertidumbre de medida expandida para la magnitud global, U_{global} , vendrá dada por la expresión 4.128.

$$U_{global} = 2 \cdot \sqrt{0,2} = 0,9 \text{ [dB]} \quad (4.128)$$

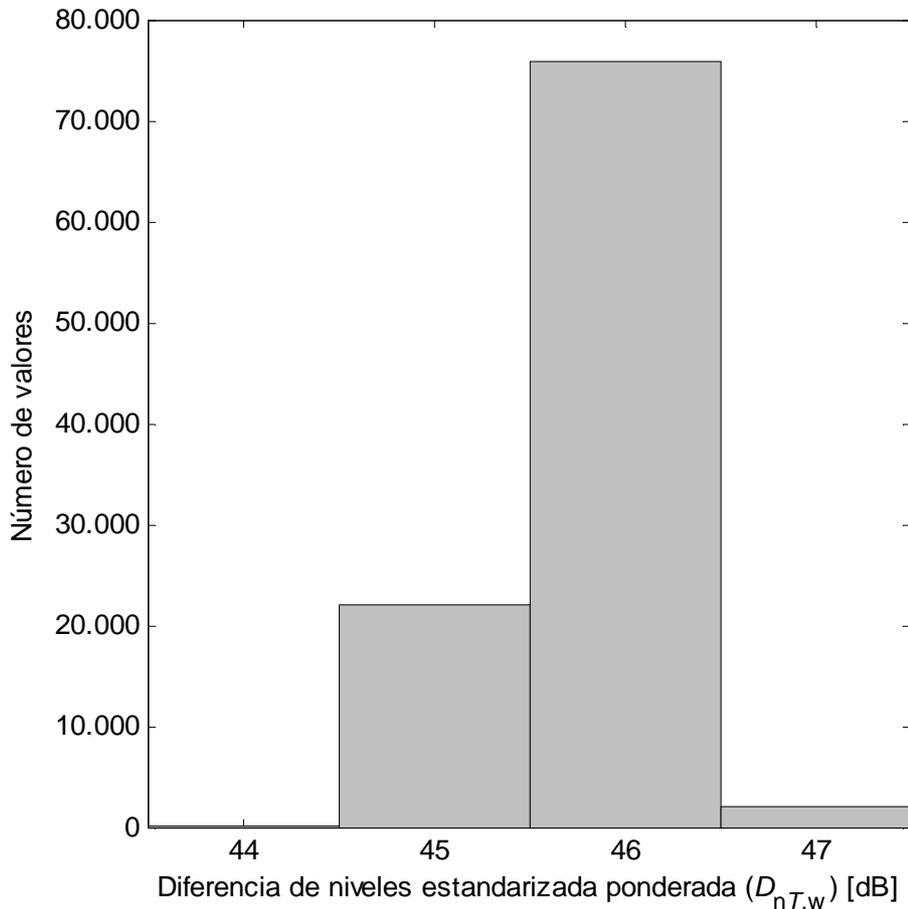


Figura 4.10 – Histograma obtenido tras efectuar Montecarlo.

A partir de este resultado, ya es posible estimar el valor de aislamiento global junto con su incertidumbre de medida asociada, $D_{nT,w inc}$, expresándolo de la forma que muestra la igualdad 4.129.

$$D_{nT,w inc} = D_{nT,w} \pm U_{global} = 46 \pm 0,9 \quad [dB] \quad (4.129)$$

4.6.3. Conclusiones

1. Cuando se nos presente un ensayo en el que algún nivel de presión sonora medido en el recinto receptor, a una determinada frecuencia, se vea perturbado por la presencia del ruido de fondo, deberá usarse la expresión particular 4.98 ó 4.118. Para el resto de frecuencias donde la medida del nivel de presión sonora en el recinto receptor no se vea afectado por la presencia de ruido de fondo, deberá emplearse la ecuación general 4.75. Evidentemente, la incertidumbre aumentará cuando el ruido de fondo es importante.
2. En vista de los resultados obtenidos, resulta poco efectivo realizar una diferenciación del nivel medio de presión sonora del ruido de fondo medido, L_{RF} , respecto del nivel medio de ruido de fondo que se registra durante la medida del nivel de presión sonora L_2 en el recinto receptor, L_{RF}' , puesto que como ya se dijo en el punto 4.5.8, este último nivel no puede ser medido ni calculado. La misma circunstancia sucede con el nivel medio de presión sonora real existente en el recinto receptor en ausencia de ruido de fondo, L_2'' .
Dicho esto, queda claro que el esfuerzo de realizar un análisis exhaustivo del ruido de fondo en cierta medida no compensa, puesto que al únicamente poder medir el nivel medio de presión sonora en el recinto receptor en presencia de ruido de fondo, L_2 , y el nivel medio de presión sonora del ruido de fondo, L_{RF} , nos encontramos con que:

- ⇒ $C_{L_{RF}}$, no se puede calcular
- ⇒ $C_{L_{RF}}$ del análisis “exhaustivo” del ruido de fondo = $C_{L_{RF}}$ del análisis con ruido de fondo
- ⇒ $C_{P_{RF}^2}$ del análisis “exhaustivo” del ruido de fondo = $C_{P_{RF}^2}$ del análisis con ruido de fondo

Por lo que, el análisis “exhaustivo” del ruido de fondo, se reduce nuevamente al análisis con ruido de fondo. Lo único que los diferencia es el factor multiplicador de valor 2 que aparece en la expresión 4.118, y que como ya se dijo en el punto 4.5.8, refleja la idea de considerar dos ruidos de fondo distintos bajo la asunción de proximidad en el tiempo de ambos. Sin embargo, dado que el peso de ese factor en la expresión 4.118 es muy pequeño, la diferencia en cuanto a resultados entre usar la expresión 4.98 ó 4.118 resulta ser prácticamente nula, al menos en escenarios similares al expuesto (para otros, no tiene porqué ser así...).

Tal y como puede verse en la Tabla 4.15, queda patente que para este ejemplo, elegir realizar una u otra estimación no modifica el valor de incertidumbre de medida. Únicamente se aprecia una ligera diferencia en los decimales menos significativos resultantes, lo que en la práctica, no supone un incremento o decremento apreciable del valor de incertidumbre.

3. Es importante destacar que en el segundo escenario, todas las frecuencias en las que la medida del nivel de presión sonora en el recinto receptor se ve afectada por el ruido de fondo, han sido corregidas empleando la expresión 4.79 ó 4.101, ya que $L_2 - L_{RF} < 10$ [dB]. Sin embargo, tal y como se vio en el Capítulo 2, podría haber existido en el ejemplo la particularidad de que $L_2 - L_{RF} \leq 6$ [dB], caso en el cual se hubiera tenido que prescindir de las expresiones anteriores y aplicar a L_2 una corrección máxima por ruido de fondo de 1,3 [dB].

Esta circunstancia hubiera afectado notablemente a la estimación de la incertidumbre de medida puesto que a cada valor del nivel de presión sonora medido en el recinto receptor y afectado fuertemente por ruido de fondo, se le resta una constante, de manera que la expresión a utilizar para corregir dicho nivel por ruido de fondo ya no será la expresión 4.78, si no la 2.10 (que por comodidad reescribimos aquí como la 4.130).

$$L_2' = L_2 - 1,3 \quad (4.130)$$

donde para cada una de las 16 frecuencias bajo estudio,

- L_2' [dB] es el nivel medio de presión sonora calculado en el recinto receptor en ausencia del ruido de fondo.
- L_2 [dB] el nivel medio de presión sonora que se obtiene de medir niveles en el recinto receptor en presencia de ruido de fondo.

Así pues, el índice D_{nT} vendrá definido por la expresión 4.77 (que por comodidad reescribimos aquí como la 4.131).

$$D_{nT} [\text{dB}] = L_1 - L_2' + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \quad (4.131)$$

Sustituyendo el valor de L_2' en la igualdad anterior, se obtiene la ecuación 4.132.

$$D_{nT} [\text{dB}] = L_1 - L_2 + 1,3 + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \quad (4.132)$$

De esta forma, se producen dos fenómenos:

- ⇒ El valor del índice D_{nT} en las frecuencias afectadas por el ruido de fondo cambia por completo (puesto que la expresión 4.132 no contempla el nivel de ruido de fondo como tal, a diferencia de la igualdad 4.79 que si lo hace). La única información de ruido de fondo existente viene dada por el propio valor de L_2 y la constante 1,3.

- ⇒ En consecuencia, la sistemática de estimación de la incertidumbre en presencia de ruido que afecte a la medida será similar a la sistemática de estimación de la incertidumbre en que la presencia del ruido de fondo no afecte a la medida, ya que las magnitudes de entrada de la expresión 4.132 son las mismas que las magnitudes de entrada de la igualdad 4.45. La única diferencia existente es que los valores de L_2 en la ecuación 4.132 son una combinación de señal y ruido de fondo, y en la expresión 4.45 únicamente señal.

Por lo tanto, la incertidumbre de medida en presencia de ruido de fondo que afecte fuertemente a la medida del nivel de presión sonora en el recinto receptor podrá estimarse también mediante la expresión 4.75, teniendo en cuenta que para este caso L_2 es una combinación de señal y ruido de fondo.

Y por consiguiente, como en la igualdad 4.75 no se tiene en cuenta la incertidumbre de medida aportada por la presencia del ruido de fondo, el valor de incertidumbre estimado para aquellas frecuencias en las que $L_2 - L_{RF} \leq 6$ [dB] será menor que el valor de incertidumbre estimado empleando la formulación para el caso en que $L_2 - L_{RF} < 10$ [dB].

Capítulo 5

CONCLUSIONES

De los objetivos propuestos al inicio del proyecto, ha sido posible desarrollar todos con cierto éxito, a pesar de que a priori algunos de ellos se aventuraran como objetivos difícilmente alcanzables. Se puede decir por lo tanto, que se han conseguido resultados satisfactorios, sin que por ello no se presentasen dificultades a lo largo de su obtención.

La primera idea que se deduce de todo el trabajo desarrollado a lo largo de este tiempo que ha durado el proyecto, es que el aislamiento acústico de recintos es, por decirlo de una forma burda pero justificada, una “ciencia” en constante evolución, muy ligada a las nuevas tecnologías y a las nuevas estructuras de edificación.

Dependiendo del tipo de recintos bajo estudio y las condiciones de medida, los métodos clásicos de medida de aislamiento a ruido aéreo pueden ser, o no, suficientes para la evaluación de la transmisión sonora de un paramento. Tendrá que ser el técnico de medidas acústicas, quien desde su conocimiento, se decida por sustituir o completar ese ensayo con métodos más novedosos como la intensimetría acústica o la generación de secuencias MLS.

Por otro lado, queda suficientemente claro que cualquier método de medida empleado para la evaluación del aislamiento a ruido aéreo de una pared, tiene su razón de ser en bases científicas lo suficientemente sólidas, para que, sea cual sea el método elegido o elegidos, deban respetarse escrupulosamente las indicaciones dadas en los mismos. El conocimiento pleno de cada uno de ellos, permitirá al técnico poder abordar con mayor facilidad los posibles problemas que pudieran presentarse a la hora de realizar el ensayo.

En cuanto a la normativa que permite estimar el índice de aislamiento global de un paramento, se puede concluir diciendo que se trata de una norma muy utilizada pero que tiende a quedarse obsoleta puesto que presenta varios problemas de pérdida de información, tal y como se ha visto en el Capítulo 3. Teniendo en cuenta además que, en la actualidad, con la informática aplicada a cualquier campo científico (como es la ingeniería acústica), no resulta muy eficiente resumir el análisis de un ensayo en un único número cuando es posible disponer del análisis completo.

Por último, en relación al extenso estudio realizado sobre la incertidumbre de medida presente en un ensayo de aislamiento a ruido aéreo entre locales, queda patente que tanto los procedimientos, la instrumentación, las magnitudes medidas e incluso el escenario de medida, influyen en el cálculo de todos y cada uno de los índices que definen la transmisión sonora sobre un paramento.

Sea cual sea el índice de valoración del aislamiento calculado, al tratarse de una magnitud medible u obtenida a partir de magnitudes medibles, lleva asociada una incertidumbre de medida, la cual define en qué cantidad el operario está realizando un ensayo “de calidad”. Cuanto mayor sea la profundización de los cálculos de estimación de incertidumbre, mejor será el ensayo realizado y el técnico de medidas podrá tener la certeza de que las medidas llevadas a cabo son fieles a la realidad.

Como conclusión final, y sirviendo de enlace con el inicio de este proyecto y para cerrar el mismo, se puede decir que el aislamiento acústico de recintos es una materia tan extensa, que por mucho que se intente dominarla al cien por cien, siempre quedan “cosas” por saber, aprender y sobre todo desarrollar...

Desde estas líneas, invito a cualquier persona que haya leído este documento y esté interesada en el mundo de la acústica, a extender algunas de las ideas expuestas aquí (las cuales se han intentado resumir en este capítulo), partiendo de los resultados y objetivos alcanzados. Algunas de estas líneas de investigación pueden ser:

- ✓ Extender la estimación de la incertidumbre de medida para el resto de índices de valoración del aislamiento que no han sido estimados.
- ✓ Evaluar la incertidumbre de medida para medidas de aislamiento a ruido aéreo de fachadas y elementos de fachadas, o incluso para medidas de aislamiento a ruido de impacto.
- ✓ Extender la evaluación de la pérdida de información del estudio del Capítulo 3 estableciendo distintos valores de varianza para cada una de las 16 frecuencias, en vez de aplicar el mismo valor para todas ellas.
- ✓ Profundizar en el estudio de los métodos alternativos para medir aislamiento a ruido aéreo entre locales e investigar de que manera pudieran ser aplicables a estimar el aislamiento a ruido aéreo de fachadas.

... o cualquier otro aspecto relacionado con todo ello.

Capítulo 6

PRESUPUESTO

6.1. INTRODUCCIÓN

De cara a una posible contratación de un estudio de la estimación de la incertidumbre de medida en un ensayo de aislamiento a ruido aéreo, resulta necesario elaborar un presupuesto orientativo del coste total que supondría el llevar a cabo este proyecto.

En la Tabla 6.1 se detallan las diferentes fases y tareas a desarrollar para la elaboración de este estudio de incertidumbre, junto con la duración temporal tanto en días como en horas de las mismas. Dicha información será de gran utilidad de cara a la posterior redacción de un presupuesto aproximado.

Para la elaboración de esta tabla, sólo se ha tenido en cuenta el trabajo a realizar a partir de todo el estudio previo que ha dado lugar a este Proyecto Fin de Carrera, y que posteriormente se incluirá en el presupuesto, considerando que cada jornada laboral dedicada al cálculo de incertidumbre se compone de 4 horas.

<u>FASE</u>	<u>TAREA</u>	<u>DÍAS</u>	<u>HORAS</u>
1. Planteamiento inicial	1.1. Propuesta de estimación	1	4
	1.2. Viabilidad del cálculo	2	8
2. Estimación de la incertidumbre de medida	2.1. Aplicación de conocimientos a la propuesta	1	4
	2.2. Adaptación de estructura de análisis a la propuesta	4	16
	2.3. Cálculo de incertidumbre	10	40
3. Análisis de resultados	3.1. Fiabilidad que se obtiene	1	4
4. Documentación	4.1. Obtención de gráficas	1	4
	4.2. Desarrollo de tablas	1	4
	4.3. Elaboración de memoria	3	12
<u>TOTAL</u>		24	96

Tabla 6.1 – Fases, tareas y duración de un cálculo de incertidumbre de medida de aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales.

Con el objetivo de obtener una idea más visual de la duración temporal que supone el cálculo de incertidumbre de medida, se ha desarrollado el Diagrama de Gantt (Figura 6.1), el cual muestra la planificación real del mismo.

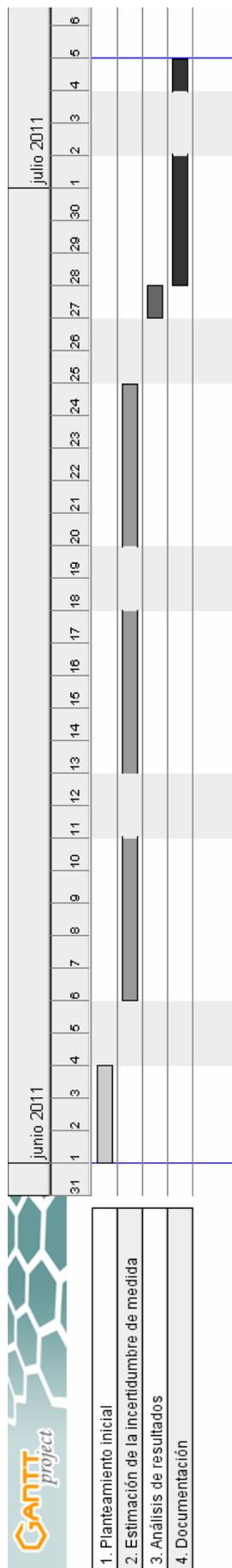


Figura 6.1 – Diagrama de Gantt del cálculo de incertidumbre de medida.

6.2. ANÁLISIS DE COSTES

Para estimar el coste total que supondría la contratación del servicio de estimación de incertidumbre de medida, habrá que tener en cuenta los diferentes perfiles implicados en la elaboración de dicho cálculo, como son: un becario de ingeniería, un ingeniero técnico de telecomunicaciones recién titulado y un programador junior. El salario para cada uno de ellos se expone en la Tabla 6.2.

<u>PERFIL</u>	<u>SALARIO</u>
Becario de ingeniería	5 € / hora
Programador junior	9 € / hora
Ingeniero técnico de telecomunicaciones recién titulado	14 € / hora

Tabla 6.2 – Retribución salarial para diferentes perfiles profesionales.

Con el objetivo de analizar minuciosamente a cuanto ascendería económicamente el que una empresa contratara dicho servicio, se ha desarrollado un presupuesto aproximado que resume los diferentes conceptos por los que un posible cliente debiera pagar.

PRESUPUESTO

- Conocimientos previos de cálculo de incertidumbre en medidas de aislamiento acústico, adquiridos en la elaboración del Proyecto Fin de Carrera
- ✓ 400 horas de cálculo estadístico (en calidad de becario) 2000 €
- ✓ 100 horas de programación estadística (en calidad de becario) 500 €
- Planteamiento inicial
- ✓ 4 horas de propuesta de estimación (en calidad de ingeniero técnico) 56 €
- ✓ 8 horas de viabilidad del cálculo (en calidad de ingeniero técnico) 112 €
- Estimación de la incertidumbre de medida
- ✓ 4 horas de aplicación de conocimientos a la propuesta (en calidad de ingeniero técnico) 56 €
- ✓ 16 horas de adaptación de estructura de análisis a la propuesta (en calidad de ingeniero técnico) 224 €
- ✓ 40 horas de cálculo de incertidumbre (en calidad de programador junior) 360 €
- Análisis de resultados
- ✓ 4 horas de análisis de fiabilidad obtenida (en calidad de ingeniero técnico) 56 €

• Documentación	
✓ 4 horas de obtención de gráficas (en calidad de programador junior)	36 €
✓ 4 horas de desarrollo de tablas (en calidad de ingeniero técnico)	56 €
✓ 12 horas de elaboración de memoria (en calidad de ingeniero técnico)	168 €
• Otros	
✓ Material fungible (gastos de impresión, encuadernación...)	60 €
✓ Mantenimiento de ordenador personal y software específico	90 €
 SUBTOTAL	 3774 €
• I.V.A. aplicable	
✓ 18 % del subtotal del presupuesto	679,32 €
 TOTAL	 4453,32 €

Por lo tanto, el presupuesto de cara a la contratación del servicio de estimación de la incertidumbre de medida asociada al cálculo de un índice de valoración de aislamiento a ruido aéreo entre locales, asciende a la cantidad de 4453,32 € (CUATRO MIL CUATROCIENTOS CINCUENTA Y TRES Euros con TREINTA Y DOS céntimos).

Leganés, a 9 de Mayo de 2011.

El ingeniero proyectista.



Fdo.: Borja Pendán Rebollo
Ingeniero Técnico de Telecomunicaciones

Glosario

NBE – CA	Normativa Básica de la Edificación – Condiciones Acústicas
DB – HR	Documento Básico – Protección frente al Ruido
CTE	Código Técnico de la Edificación
ISO	International Organization for Standardization
UNE – EN	Una Norma Española – Norma Europea
MLS	Maximum Length Sequence
SNR	Signal to Noise Ratio
FFT	Fast Fourier Transform
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
RMS	Root Mean Square

Referencias

- [1] Cyril M. Harris. *“Manual de Medidas Acústicas y Control del Ruido”*, Mc. Graw Hill, 1995.
- [2] Manuel Recuero López. *“Acústica Arquitectónica Aplicada”*, Thomson Paraninfo, 1999.
- [3] Manuel Recuero López. *“Acondicionamiento Acústico”*, Thomson Paraninfo, 2001.
- [4] Manuel Recuero López. *“Ingeniería Acústica”*, Thomson Paraninfo, 1999.
- [5] Higinio Arau. *“ABC de la Acústica Arquitectónica”*, CEAC, 1999.
- [6] Ministerio de Vivienda. *“Nota de Prensa: Entra en Vigor la Nueva Normativa Contra el Ruido en los Hogares”*, Gabinete de Prensa del Ministerio de Vivienda, 23 de Abril de 2009.
- [7] Ministerio de Vivienda. *“DB – HR Protección Frente al Ruido”*, Código Técnico de la Edificación, Abril de 2009.
- [8] Composan Construcción S.A. *“Manual de Aislamiento Acústico”*, Junio de 2008.
- [9] Organización Granada Contra el Ruido. *“Efectos del Ruido sobre la Salud, la Sociedad y la Economía”*. Versión traducida al castellano del documento de la Organización Mundial de la Salud (OMS). *“Guidelines for Community Noise”*, 1999.
- [10] Carlos De La Colina Tejeda y Antonio Moreno Arranz. *“Acústica de la Edificación”*, Fundación Escuela de la Edificación, 2000.
- [11] BOE número 276. *“Ley 37 / 2003, de 17 de noviembre, del Ruido”*, Noviembre de 2003.
- [12] BOE número 254. *“Real Decreto 1367/ 2007, de 19 de octubre”*, Octubre de 2007.
- [13] Amelia Romero Fernández – M^a Teresa Carrascal García. *“La Ley del Ruido y sus Implicaciones en la Edificación”*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Julio de 2008.
- [14] Isover. *“Manual de Aislamiento Acústico”*, Julio de 2000.
- [15] David Utrilla Aznar. *“Proyecto Fin de Carrera: Acondicionamiento Acústico y Legalización de un Pub”*. Universidad Carlos III de Madrid, Noviembre de 2003.
- [16] AENOR, *“UNE EN ISO 140 – 4: Acústica. Medición del aislamiento acústico de los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4 – Medición in situ del aislamiento a ruido aéreo entre locales”*, Abril de 1999.
- [17] AENOR, *“UNE EN ISO 140 – 14: Acústica. Medición del aislamiento acústico de los edificios y de los elementos de construcción. Parte 14 – Directrices para situaciones especiales in situ”*, Mayo de 2005.
- [18] AENOR, *“UNE EN ISO 1996 – 2: Acústica. Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2 – Determinación de los niveles de ruido ambiental”*, Septiembre de 2009.
- [19] Brüel & Kjaer Ibérica S.A., *“Soluciones para la medida y análisis de ruido”*, Noviembre de 2004.
- [20] Brüel & Kjaer Ibérica S.A., *“Programa de tiempo de reverberación BZ – 7227 2250 para el analizador portátil – Tipo 2250 – F – y programa para pc post – procesado: Qualifier Light Tipo 7831”*, Octubre de 2006.
- [21] Brüel & Kjaer Ibérica S.A., *“Analizadores portátiles – Tipo 2250 y 2270, con el Software de acústica de edificios de dos canales BZ – 7229 y el Software Qualifier Tipo 7830”*, Septiembre de 2008.
- [22] Sociedad Española de Acústica (SEA), *“Revista de Acústica Vol.40, Num. 3 – 4”*, 2009.
- [23] Juan Cruz Giménez de Paz. *“Ruido: Para los posgrados en higiene y seguridad industrial”*, 2007.
- [24] Juan Cruz Giménez de Paz. *“Promedios de niveles sonoros”*, 2009.
- [25] Arana, M.; San Martín, R.; Martín, J. *“Medida simultánea de índices de reducción sonora aparente en diferentes paneles mediante técnica intensimétrica”*. Laboratorio de Acústica, Departamento de Física, Universidad Pública de Navarra, Octubre de 2003.
- [26] María Machimbarrena Gutiérrez. *“Estudio comparativo del aislamiento sonoro por los métodos de presión y de intensidad”*, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valladolid, Mayo de 1999.
- [27] Carpena, M.J.; Vera, J.; Bleda, S. y Gimeno, E. *“Medidas de aislamiento a ruido aéreo en cerramientos arquitectónicos con técnicas MLS”*, Universidad de Alicante, Septiembre de 2003.

- [28] Soler Rocasalbas, Sergi; Vila Deuchbein, Carles; Rossell Turull, Ivana. “*Modificación de las secuencias MLS para la medida del aislamiento acústico*”, Septiembre de 2005.
- [29] AENOR. “*UNE EN ISO 717 – 1: Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1 – Aislamiento a ruido aéreo*”, Agosto de 1997.
- [30] Gregorio Munuera Saura. “*Tesis Doctoral: Técnicas avanzadas de medida en intensimetría acústica para la caracterización de materiales aislantes*”, Universidad Politécnica de Cartagena, Abril de 2008.
- [31] Roberto Borjabad. “*Aplicaciones prácticas de la técnica MLS en medidas de acústica arquitectónica*”, Norsonic AS, 1996.
- [32] José Luis Sánchez Bote. “*Sistemas de refuerzo sonoro y megafonía*”, Dpto. Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, 1999.
- [33] Adrián Fuentes Utrilla. “*Proyecto Fin de Carrera: Grabación de una base de datos de instrumentos musicales en cámara anecoica*”, Universidad Carlos III de Madrid, Junio de 2008.
- [34] Dolores García Escribano. “*Proyecto Fin de Carrera: Estudio acústico de una sala polivalente*”, Universidad Carlos III de Madrid, Julio de 2007.
- [35] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML. “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*” (GUM), 1995.
- [36] Centro Español de Metrología. “*Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*”, 2000.
- [37] Centro Nacional de Metrología de México. “*Guía para estimar la incertidumbre de la medición*”, Mayo de 2000.
- [38] Ente Costarricense de Acreditación (ECA). “*Guía para el cálculo de la incertidumbre*”, Octubre de 2004.
- [39] ENAC. “*Guía para la expresión de la incertidumbre en los ensayos cuantitativos*”, Julio de 2005.
- [40] Richard Payne. “*NPL REPORT DQL – AC 002: Uncertainties associated with the use of a sound level meter*”, Abril de 2004.
- [41] “*IMA32TR – 040510 – SP08: Determination of L_{den} and L_{night} using measurements*”, Enero de 2006.
- [42] J. A. Mondaray, F.J. Yebra y L. Lorenzo. “*Empleo en campo de los sonómetros. Factores a considerar y su contribución a la incertidumbre de medida*”, Mayo de 2005.
- [43] M. A. Navacerrada, C. Díaz, A. Pedrero and L. Iglesias. “*Calculus of the uncertainty in acoustic field measurements: Comparative study between the uncertainty propagation method and the distribution propagation method*”, Octubre de 2008.
- [44] J. C. Cid, M. A. Sobreira Seoane. “*Uncertainty evaluation for airborne noise acoustic insulation measurements*”, International Congress On Acoustics (ICA), Madrid, Septiembre de 2007.
- [45] A. López Quílez y E. López Quílez. “*Estimación de la incertidumbre de medida en ensayos de aislamiento acústico en la edificación*”, 2006.
- [46] Javier Castillo Cid. “*Proyecto Fin de Carrera: Evaluación de la incertidumbre de medida en un supuesto de aislamiento in situ a ruido aéreo*”, 2006 – 2007.
- [47] AENOR, “*UNE EN ISO 3382 – 2: Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2 – Tiempo de reverberación en recintos ordinarios*”, Diciembre de 2008.
- [48] AENOR, “*UNE – EN 61672 – 1: Electroacústica. Sonómetros. Parte 1: Especificaciones*”, Abril de 2005.
- [49] 01dB-Stell, “*Sound power determination according to ISO 9614 standard*”, Junio de 2001.
- [50] Lardson Davis Inc., “*Model 2260 Sound Intensity Probe*”.
- [51] AENOR, “*UNE – EN ISO 9614 – 2: Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica emitidos por las fuentes de ruido por intensidad del sonido. Parte 2: Medición por barrido*”, Febrero de 1997.
- [52] Ole Herman Bjor, “*Maximum Length Sequence*”, Norsonic AS, 1995 – 2000.
- [53] Norsonic AS, “*MLS – a revolutionary measurement mode for building acoustics !*”, 1995 – 2000.

Anexo 1

ESPECTROS USADOS PARA EL ANÁLISIS DE LA NORMA UNE – EN ISO 717 – 1: 1997

A1.1. MOTIVACIÓN

Para realizar el análisis de esta norma, se ha creado este anexo, donde poder consultar cada una de las diferentes curvas de medida que se van a utilizar a lo largo de todo el Capítulo 3.

Se trata de espectros generados para poder explicar algunos fenómenos interesantes que se suceden del empleo del “método de comparación” para obtener el aislamiento global de un paramento y que permiten obtener conclusiones objetivas de los resultados obtenidos mediante su uso.

A continuación se detalla una tabla con los valores de aislamiento medidos y su correspondiente representación en bandas de tercio de octava para cada uno de ellos.

A1.2. PRIMER ESPECTRO

f [Hz]	D_{nT} [dB]
50	-
63	-
80	-
100	33
125	42
160	42
200	42
250	42
315	47
400	49
500	51
630	51
800	52
1000	56
1250	56
1600	56
2000	65
2500	65
3150	65
4000	-
5000	-

Tabla A1.1

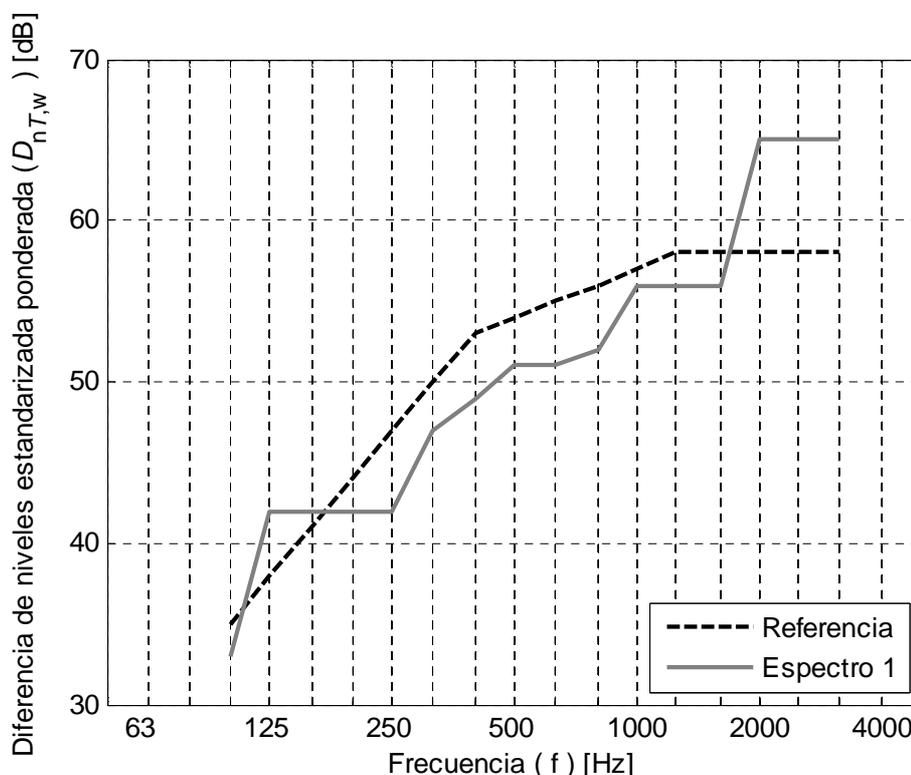


Figura A1.1 – Resultado tras efectuar el método de comparación.

A1.3. SEGUNDO ESPECTRO

f [Hz]	D_{nT} [dB]
50	-
63	-
80	-
100	30
125	38
160	38
200	38
250	40
315	47
400	49
500	51
630	54
800	57
1000	59
1250	60
1600	61
2000	62
2500	62
3150	62
4000	-
5000	-

Tabla A1.2

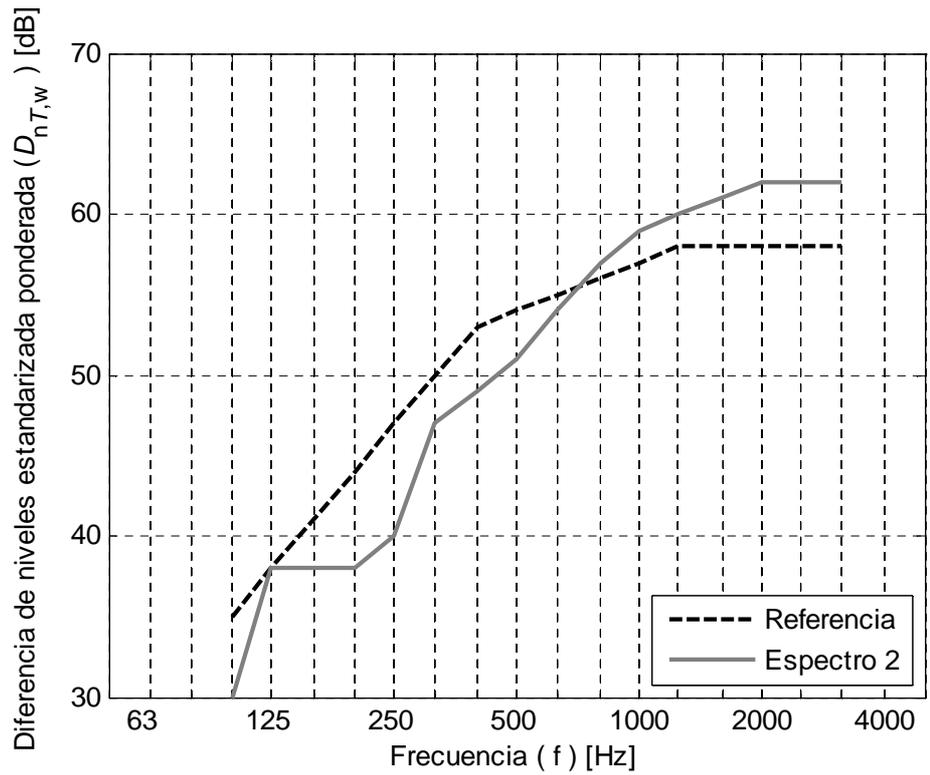


Figura A1.2 – Resultado tras efectuar el método de comparación.

A1.4. TERCER ESPECTRO

f [Hz]	D_{nT} [dB]
50	-
63	-
80	-
100	33
125	36
160	39
200	42
250	45
315	48
400	51
500	52
630	53
800	54
1000	55
1250	56
1600	56
2000	56
2500	56
3150	56
4000	-
5000	-

Tabla A1.3

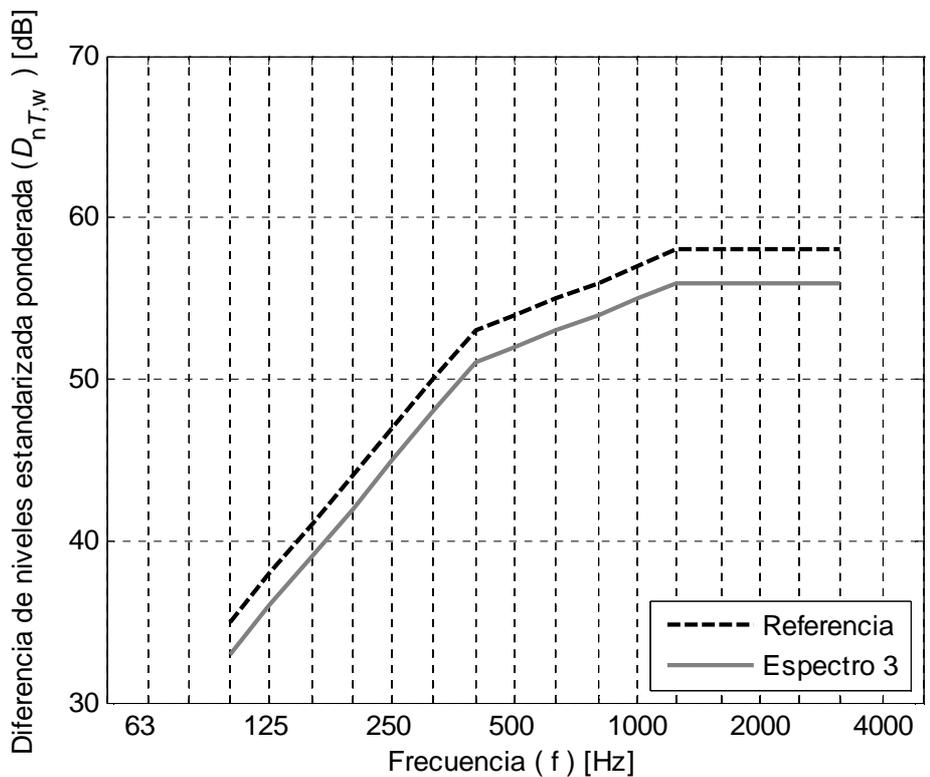


Figura A1.3 – Resultado tras efectuar el método de comparación.

A1.5. CUARTO ESPECTRO

f [Hz]	D_{nT} [dB]
50	-
63	-
80	-
100	54
125	54
160	54
200	54
250	54
315	54
400	54
500	54
630	54
800	54
1000	54
1250	54
1600	54
2000	54
2500	54
3150	54
4000	-
5000	-

Tabla A1.4

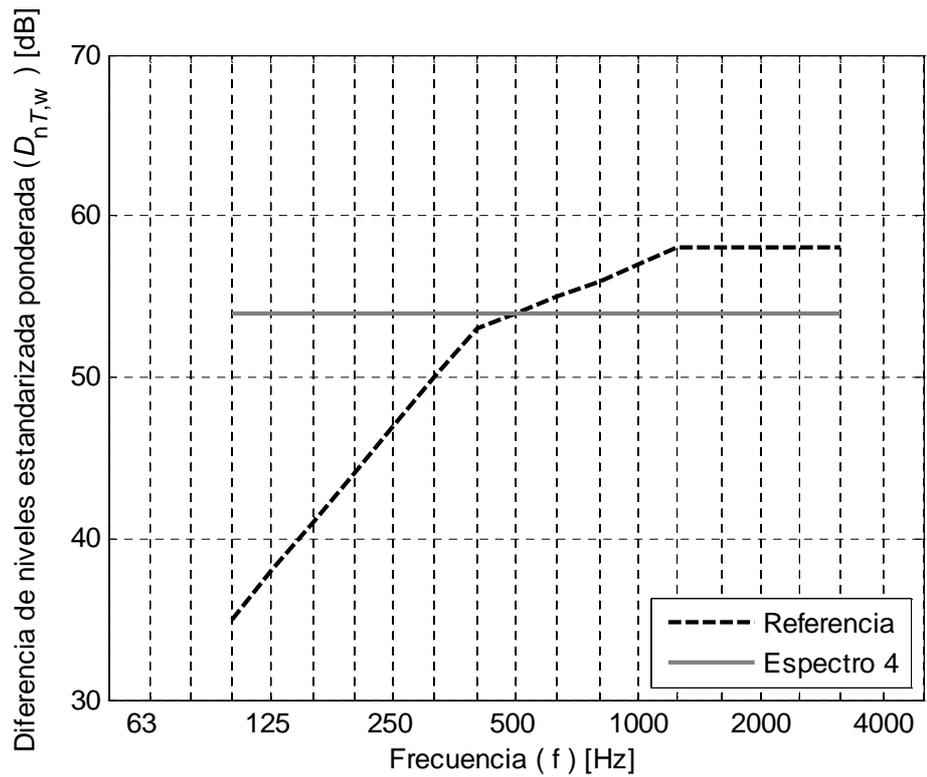


Figura A1.4 – Resultado tras efectuar el método de comparación.

A1.6. QUINTO ESPECTRO

f [Hz]	D_{nT} [dB]
50	-
63	-
80	-
100	69
125	69
160	69
200	69
250	69
315	68
400	67
500	66
630	65
800	64
1000	61
1250	58
1600	55
2000	52
2500	49
3150	46
4000	-
5000	-

Tabla A1.5

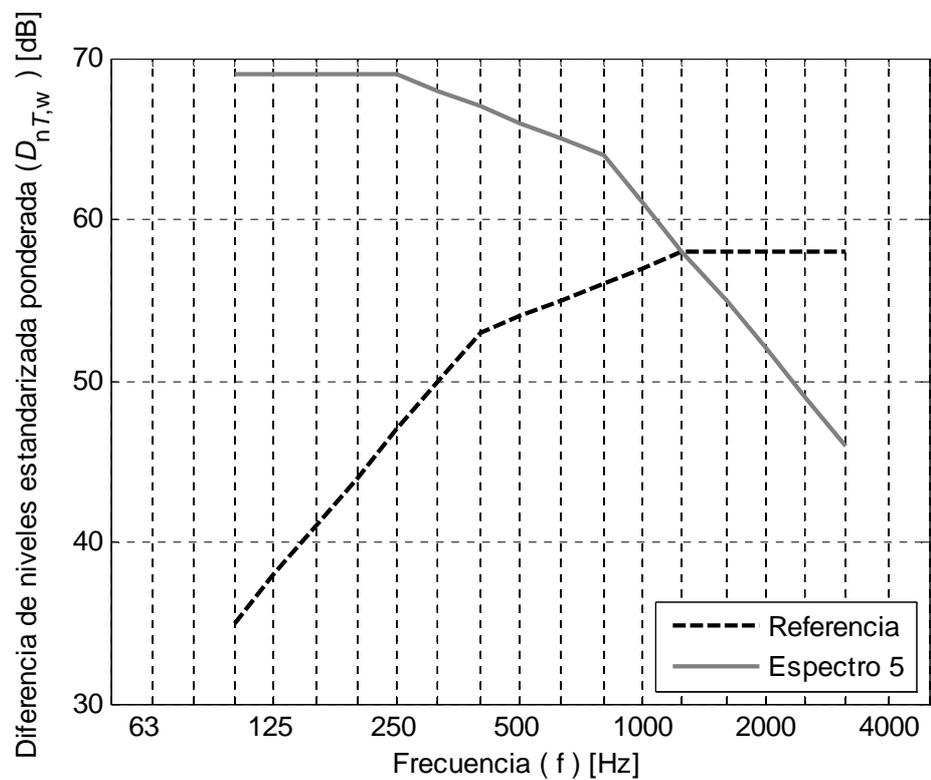


Figura A1.5 – Resultado tras efectuar el método de comparación.

A1.7. SEXTO ESPECTRO

f [Hz]	D_{nT} [dB]
50	-
63	-
80	-
100	53,4
125	53,4
160	53,4
200	53,4
250	53,4
315	53,4
400	53,4
500	53,4
630	53,4
800	53,4
1000	53,4
1250	53,4
1600	53,4
2000	53,4
2500	53,4
3150	53,4
4000	-
5000	-

Tabla A1.6

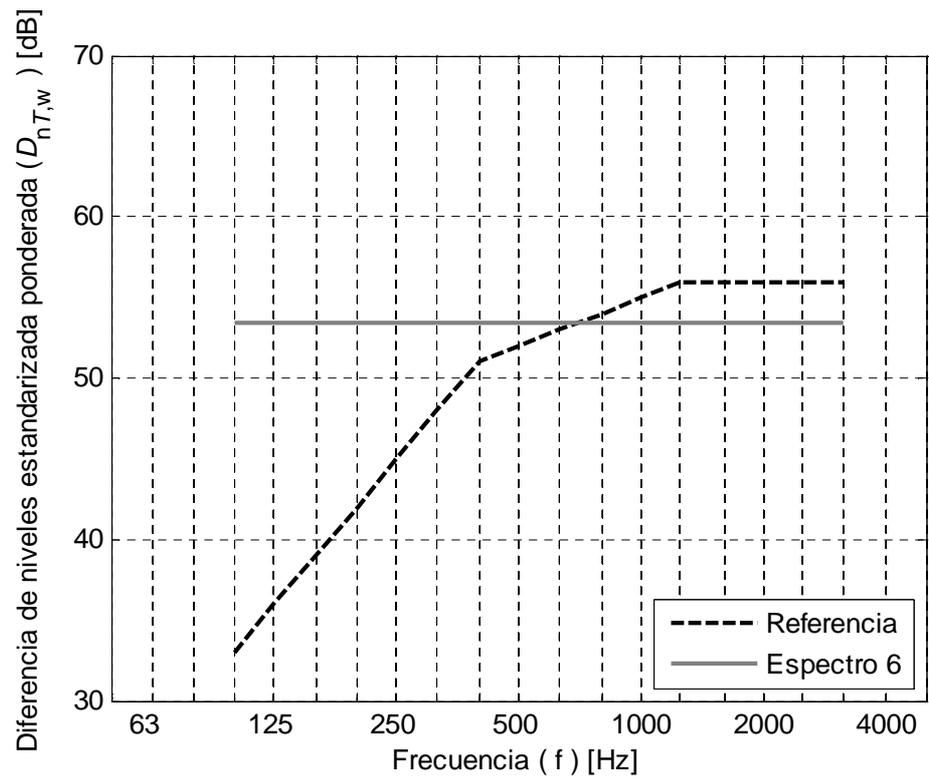


Figura A1.6 – Situación de partida antes de efectuar el método.

A1.8. SÉPTIMO ESPECTRO

f [Hz]	D_{nT} [dB]
50	-
63	-
80	-
100	68,6
125	68,6
160	68,6
200	68,6
250	68,6
315	67,6
400	66,6
500	65,6
630	64,6
800	63,6
1000	60,6
1250	57,6
1600	54,6
2000	51,6
2500	48,6
3150	45,6
4000	-
5000	-

Tabla A1.7

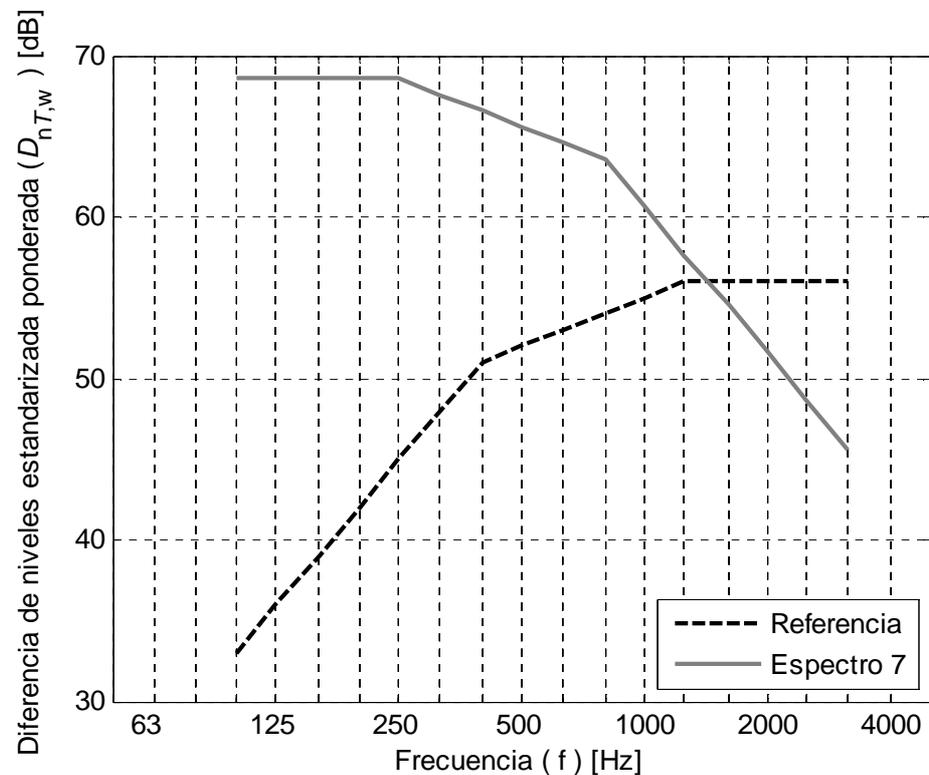


Figura A1.7 – Situación de partida antes de efectuar el método.

Anexo 2

CÁLCULO DE COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD

A2.1. MOTIVACIÓN

Este anexo expone las operaciones de derivación realizadas en el apartado 4.5 del Capítulo 4, las cuales permiten obtener los diferentes coeficientes de sensibilidad de una función bajo estudio.

A2.2. COEFICIENTES PARA EL CASO GENERAL (SIN RUIDO DE FONDO)

$$\begin{aligned}c_{P_1^2} &= \frac{\partial D_{nT}}{\partial P_1^2} = \frac{\partial \left[10 \cdot \log \left(\frac{P_1^2}{P_0^2} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial P_1^2} = \\ &= \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{\partial \left[\log \left(\frac{P_1^2}{P_0^2} \right) \right]}{\partial P_1^2} = \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{P_0^2}{P_1^2} \cdot \frac{\partial \left[\frac{P_1^2}{P_0^2} \right]}{\partial P_1^2} = \\ &= \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{P_0^2}{P_1^2} \cdot \frac{1}{P_0^2} \frac{\partial P_1^2}{\partial P_1^2} = \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{1}{P_1^2} \text{ [Pa]}^2\end{aligned}\tag{A2.1}$$

$$\begin{aligned}c_{P_2^2} &= \frac{\partial D_{nT}}{\partial P_2^2} = \frac{\partial \left[10 \cdot \log \left(\frac{P_1^2}{P_0^2} \right) - 10 \cdot \log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial P_2^2} = \\ &= \frac{-10}{\ln 10} \cdot \frac{\partial \left[\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) \right]}{\partial P_2^2} = \frac{-10}{\ln 10} \cdot \frac{P_0^2}{P_2^2} \cdot \frac{\partial \left[\frac{P_2^2}{P_0^2} \right]}{\partial P_2^2} = \\ &= \frac{-10}{\ln 10} \cdot \frac{P_0^2}{P_2^2} \cdot \frac{1}{P_0^2} \frac{\partial P_2^2}{\partial P_2^2} = \frac{-10}{\ln 10} \cdot \frac{1}{P_2^2} \text{ [Pa]}^2\end{aligned}\tag{A2.2}$$

$$c_{L_1} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial L_1} = \frac{\partial \left[L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial L_1} = \frac{\partial L_1}{\partial L_1} = 1 \text{ [*]}\tag{A2.3}$$

$$c_{L_2} = \frac{\partial D_{nT}}{\partial L_2} = \frac{\partial \left[L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial L_2} = -\frac{\partial L_2}{\partial L_2} = -1 \quad [*] \quad (\text{A2.4})$$

$$\begin{aligned} c_T &= \frac{\partial D_{nT}}{\partial T} = \frac{\partial \left[L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial T} = \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{\partial \left[\log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial T} = \\ &= \frac{10}{\ln 10} \cdot 0,5 \cdot \frac{\partial \left[\frac{T}{0,5} \right]}{\partial T} = \frac{10}{\ln 10} \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{0,5} \frac{\partial T}{\partial T} = \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{1}{T} \quad [\text{s}^{-1}] \end{aligned} \quad (\text{A2.5})$$

A2.3. COEFICIENTES PARA EL CASO PARTICULAR (CON RUIDO DE FONDO)

$$\begin{aligned} c_{P_2^2} &= \frac{\partial D_{nT}}{\partial P_2^2} = \frac{\partial \left[L_1 - \left[10 \cdot \log \left(10^{10 \cdot \log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) / 10} - 10^{10 \cdot \log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right) / 10} \right) \right] + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial P_2^2} = \\ &= -10 \cdot \frac{\partial \left[\log \left(10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}} \right) \right]}{\partial P_2^2} = \frac{-10}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \\ &\cdot \frac{\partial \left[10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}} \right]}{\partial P_2^2} = \frac{-10}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial \left[10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} \right]}{\partial P_2^2} = \\ &= \frac{-10}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \left(10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} \right) \cdot \ln 10 \cdot \frac{\partial \left[\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) \right]}{\partial P_2^2} = \\ &= \frac{-10 \cdot \left(10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} \right)}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{P_0^2}{P_2^2} \cdot \frac{\partial \left[\frac{P_2^2}{P_0^2} \right]}{\partial P_2^2} = \\ &= \frac{-10 \cdot \left(10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} \right)}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{P_0^2}{P_2^2} \cdot \frac{1}{P_0^2} \cdot \frac{\partial P_2^2}{\partial P_2^2} = \frac{-10 \cdot \left(10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} \right)}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}}} \cdot \frac{1}{\ln 10 \cdot P_2^2} \quad [\text{Pa}]^2 \end{aligned} \quad (\text{A2.6})$$

$$\begin{aligned}
c_{P_{RF}^2} &= \frac{\partial D_{nT}}{\partial P_{RF}^2} = \frac{\partial \left[L_1 - \left[10 \cdot \log \left(10^{10 \cdot \log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) / 10} - 10^{10 \cdot \log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right) / 10} \right) \right] + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= -10 \cdot \frac{\partial \left[\log \left(10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)} \right) \right]}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{-10}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial \left[10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)} \right]}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{10}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial \left[10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)} \right]}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{10}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \left(10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)} \right) \cdot \ln 10 \cdot \frac{\partial \left[\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right) \right]}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{10 \cdot \left(10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)} \right)}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{P_0^2}{P_{RF}^2} \cdot \frac{\partial \left[\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right]}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{10 \cdot \left(10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)} \right)}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{P_0^2}{P_{RF}^2} \cdot \frac{1}{P_0^2} \cdot \frac{\partial P_{RF}^2}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{10 \cdot \left(10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)} \right)}{10^{\log \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right)} - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{1}{P_{RF}^2} \text{ [Pa]}^{-2}
\end{aligned} \tag{A2.7}$$

$$\begin{aligned}
c_{L_2} &= \frac{\partial D_{nT}}{\partial L_2} = \frac{\partial \left[L_1 - [10 \cdot \log (10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10})] + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial L_2} = \\
&= -10 \cdot \frac{\partial [\log (10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10})]}{\partial L_2} = \frac{-10}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial [10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}]}{\partial L_2} = \\
&= \frac{-10}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial [10^{L_2/10}]}{\partial L_2} = \\
&= \frac{-10}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot (10^{L_2/10}) \cdot \ln 10 \cdot \frac{\partial \left[\frac{L_2}{10} \right]}{\partial L_2} = \\
&= \frac{-10 \cdot (10^{L_2/10})}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{\partial L_2}{\partial L_2} = \frac{-10^{L_2/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \quad [*]
\end{aligned} \tag{A2.8}$$

$$\begin{aligned}
c_{L_{RF}} &= \frac{\partial D_{nT}}{\partial L_{RF}} = \frac{\partial \left[L_1 - [10 \cdot \log (10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10})] + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial L_{RF}} = \\
&= -10 \cdot \frac{\partial [\log (10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10})]}{\partial L_{RF}} = \\
&= \frac{-10}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial [10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}]}{\partial L_{RF}} = \\
&= \frac{10}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial [10^{L_{RF}/10}]}{\partial L_{RF}} = \\
&= \frac{10}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot (10^{L_{RF}/10}) \cdot \ln 10 \cdot \frac{\partial \left[\frac{L_{RF}}{10} \right]}{\partial L_{RF}} = \\
&= \frac{10 \cdot (10^{L_{RF}/10})}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{\partial L_{RF}}{\partial L_{RF}} = \frac{10^{L_{RF}/10}}{10^{L_2/10} - 10^{L_{RF}/10}} \quad [*]
\end{aligned} \tag{A2.9}$$

A2.4. COEFICIENTES PARA EL ANÁLISIS EXHAUSTIVO DEL RUIDO DE FONDO

$$\begin{aligned}
c_{L_{RF}} &= \frac{\partial D_{nT}}{\partial L_{RF}} = \frac{\partial \left[L_1 - [10 \cdot \log \{ (10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10} \}] + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial L_{RF}} = \\
&= -10 \cdot \frac{\partial [\log \{ (10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10} \}]}{\partial L_{RF}} = \\
&= \frac{-10}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial [(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}]}{\partial L_{RF}} =
\end{aligned} \tag{A2.10}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{10}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial [10^{L_{RF}/10}]}{\partial L_{RF}} = \\
&= \frac{10}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{(10^{L_{RF}/10})}{\partial L_{RF}} \cdot \ln 10 \cdot \frac{\partial \left[\frac{L_{RF}}{10} \right]}{\partial L_{RF}} = \\
&= \frac{10 \cdot (10^{L_{RF}/10})}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{\partial L_{RF}}{\partial L_{RF}} = \frac{10^{L_{RF}/10}}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \quad [*]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_{L_{RF}'} &= \frac{\partial D_{nT}}{\partial L_{RF}'} = \frac{\partial \left[L_1 - \left[10 \cdot \log \left\{ (10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10} \right\} \right] + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial L_{RF}'} = \\
&= -10 \cdot \frac{\partial \left[\log \left\{ (10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10} \right\} \right]}{\partial L_{RF}'} = \\
&= \frac{-10}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial \left[(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10} \right]}{\partial L_{RF}'} = \\
&= \frac{-10}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial [10^{L_{RF}'/10}]}{\partial L_{RF}'} = \tag{A2.11} \\
&= \frac{-10}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot (10^{L_{RF}'/10}) \cdot \ln 10 \cdot \frac{\partial \left[\frac{L_{RF}'}{10} \right]}{\partial L_{RF}'} = \\
&= \frac{-10 \cdot (10^{L_{RF}'/10})}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{\partial L_{RF}'}{\partial L_{RF}'} = \frac{-10^{L_{RF}'/10}}{(10^{L_2''/10} + 10^{L_{RF}'/10}) - 10^{L_{RF}/10}} \quad [*]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_{P_{RF}^2} &= \frac{\partial D_{nT}}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{\partial \left[L_1 - \left[10 \cdot \log \left\{ \left(10^{10 \cdot \log \left(\frac{P_2''^2}{P_0^2} \right) / 10} + 10^{10 \cdot \log \left(\frac{P_{RF}'^2}{P_0^2} \right) / 10} \right) - 10^{10 \cdot \log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right) / 10} \right\} \right] + 10 \cdot \log \left(\frac{T}{0,5} \right) \right]}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= -10 \cdot \frac{\partial \left[\log \left\{ \left(10^{\log \left(\frac{P_2''^2}{P_0^2} \right)} + 10^{\log \left(\frac{P_{RF}'^2}{P_0^2} \right)} \right) - 10^{\log \left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right)} \right\} \right]}{\partial P_{RF}^2} =
\end{aligned}$$

(A2.12)

$$\begin{aligned}
&= \frac{-10}{\left(10^{\log\left(\frac{P_2''^2}{P_0^2}\right)} + 10^{\log\left(\frac{P_{RF}'^2}{P_0^2}\right)}\right) - 10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial \left[\left(10^{\log\left(\frac{P_2''^2}{P_0^2}\right)} + 10^{\log\left(\frac{P_{RF}'^2}{P_0^2}\right)}\right) - 10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)} \right]}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{10}{\left(10^{\log\left(\frac{P_2''^2}{P_0^2}\right)} + 10^{\log\left(\frac{P_{RF}'^2}{P_0^2}\right)}\right) - 10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{\partial \left[10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)} \right]}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{10}{\left(10^{\log\left(\frac{P_2''^2}{P_0^2}\right)} + 10^{\log\left(\frac{P_{RF}'^2}{P_0^2}\right)}\right) - 10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \left(10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}\right) \cdot \ln 10 \cdot \frac{\partial \left[\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right) \right]}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{10}{\left(10^{\log\left(\frac{P_2''^2}{P_0^2}\right)} + 10^{\log\left(\frac{P_{RF}'^2}{P_0^2}\right)}\right) - 10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}} \cdot \left(10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}\right) \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{P_0^2}{P_{RF}^2} \cdot \frac{\partial \left[\frac{P_{RF}^2}{P_0^2} \right]}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{10}{\left(10^{\log\left(\frac{P_2''^2}{P_0^2}\right)} + 10^{\log\left(\frac{P_{RF}'^2}{P_0^2}\right)}\right) - 10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}} \cdot \left(10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}\right) \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{P_0^2}{P_{RF}^2} \cdot \frac{1}{P_0^2} \cdot \frac{\partial P_{RF}^2}{\partial P_{RF}^2} = \\
&= \frac{10}{\left(10^{\log\left(\frac{P_2''^2}{P_0^2}\right)} + 10^{\log\left(\frac{P_{RF}'^2}{P_0^2}\right)}\right) - 10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}} \cdot \left(10^{\log\left(\frac{P_{RF}^2}{P_0^2}\right)}\right) \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{1}{P_{RF}^2} \quad [\text{Pa}]^{-2}
\end{aligned}$$

✓ El símbolo (*) indica que el resultado de las ecuaciones es adimensional.

Anexo 3

COMPONENTES QUE DERIVAN DEL INSTRUMENTO DE MEDIDA

A3.1. MOTIVACIÓN

En el Anexo 3 se dan a conocer las diferentes componentes, derivadas del empleo de un analizador sonoro como instrumento de medida, que contribuyen a la incertidumbre, y que en su totalidad, son una fuente de incertidumbre considerable que debe tenerse en cuenta a la hora de elaborar un informe técnico.

A3.2. CLASIFICACIÓN DE COMPONENTES

Según el documento [40] de Abril de 2004, el autor Richard Payne reconoce hasta 15 componentes distintas que contribuyen a la incertidumbre.

Estas mismas componentes fueron revisadas y redefinidas en un total de 14 por Javier del Castillo Cid y Manuel Sobreira Seoane de la forma que se describe en el artículo [44] de Septiembre de 2007, permitiendo ser clasificadas para su estudio en dos grupos bien diferenciados, los cuales se exponen a continuación.

1. Componentes que derivan de las operaciones internas del sonómetro

- ✓ Linealidad del sonómetro en su rango de referencia.
- ✓ Detector RMS del sonómetro evaluado eléctricamente.
- ✓ Calibración eléctrica del nivel de presión sonora.
- ✓ Calibración acústica del nivel de presión sonora.
- ✓ Función de ponderación temporal (fast o slow).
- ✓ Resolución finita del display del sonómetro.
- ✓ Comprobación inicial del sonómetro utilizando un calibrador acústico.
- ✓ Utilización del calibrador acústico sobre su valor certificado.

2. Componentes que derivan del uso del sonómetro en un ensayo

- ✓ Variaciones de la temperatura.
- ✓ Variaciones de la presión atmosférica.
- ✓ Carcasa del sonómetro.
- ✓ Directividad del micrófono.
- ✓ Pantalla antiviento.
- ✓ Observador o técnico.

A3.3. INCERTIDUMBRE DEFINIDA POR COMPONENTES ASOCIADAS AL SONÓMETRO

Dado que para calcular la *diferencia de niveles estandarizada* es necesario medir diferentes niveles de presión sonora, a la hora de estimar su incertidumbre de medida, resultará obligado incluir las contribuciones de las componentes que afectan al instrumento de medida. Por lo tanto, cualquier nivel de presión sonora medido, deberá incluir su contribución asociada tal y como se define en la expresión A3.1.

$$\begin{aligned}
L_i &= \tilde{L}_i + u_{slm}(L_i) = \\
&= \tilde{L}_i + u(\delta_{lin}) + u(\delta_{rms}) + u(\delta_{ce}) + u(\delta_{ca}) + u(\delta_{pt}) + u(\delta_{res}) + u(\delta_{ai}) \\
&\quad + u(\delta_{uvc}) + u(\delta_{vt}) + u(\delta_{vp}) + u(\delta_c) + u(\delta_{dir}) + u(\delta_{pa}) + u(\delta_{obs})
\end{aligned} \tag{A3.1}$$

donde, para cada frecuencia, L_i [dB] es el nivel de presión sonora medido (ya sea nivel de señal, de ruido de fondo, o una combinación de ambos). Este nivel se compone de:

- \tilde{L}_i [dB], que es el nivel de presión sonora existente, del cual se desconoce su valor porque lleva una incertidumbre de medida asociada.
- $u_{slm}(L_i)$, que es la contribución de incertidumbre asociada al uso del sonómetro cuando se mide ese nivel. A su vez, esta contribución está compuesta por 14 contribuciones individuales, cada una de las cuales se encuentra asociada con una de las 14 componentes definidas, de manera que:
 1. $u(\delta_{lin})$ es la contribución debido a la linealidad del sonómetro en su rango de referencia.
 2. $u(\delta_{rms})$ es la contribución debido al detector RMS del sonómetro evaluado eléctricamente.
 3. $u(\delta_{ce})$ es la contribución debido a la calibración eléctrica del nivel de presión sonora.
 4. $u(\delta_{ca})$ es la contribución debido a la calibración acústica del nivel de presión sonora.
 5. $u(\delta_{pt})$ es la contribución debido a la función de ponderación temporal (fast o slow).
 6. $u(\delta_{res})$ es la contribución debido a la resolución finita del display del sonómetro.
 7. $u(\delta_{ci})$ es la contribución debido a la comprobación inicial de la calibración del sonómetro.
 8. $u(\delta_{uvc})$ es la contribución debido a la utilización del calibrador sobre su valor certificado.
 9. $u(\delta_{vt})$ es la contribución debido a las variaciones de temperatura.
 10. $u(\delta_{vp})$ es la contribución debido a las variaciones de la presión atmosférica.
 11. $u(\delta_c)$ es la contribución debido a la carcasa del sonómetro.
 12. $u(\delta_{dir})$ es la contribución debido a la directividad del micrófono.
 13. $u(\delta_{pa})$ es la contribución debido a la pantalla antiviento.
 14. $u(\delta_{obs})$ es la contribución debido al observador o técnico.

Todas estas contribuciones o incertidumbres se consideran de "Tipo B", puesto que se estiman a partir de los resultados obtenidos de una serie de pruebas de verificación y calibración en un laboratorio de calibración, por lo que la mayoría de ellas son estimadas, normalmente, en el propio laboratorio de calibración.

A3.4. APORTACIÓN DE CADA COMPONENTE A LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

1. Linealidad del sonómetro en su rango de referencia

La incertidumbre típica asociada a la linealidad del sonómetro se obtendrá mediante el cálculo de la desviación típica experimental de dichas desviaciones, tal y como puede verse en la ecuación A3.2.

$$u(\delta_{lin}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (L_{ideal} - \bar{L}_{ideal})^2} \text{ [dB]} \tag{A3.2}$$

donde, para cada frecuencia, la desviación a la característica ideal, L_{ideal} [dB], vendrá dada por la diferencia entre el nivel esperado, L_j' [dB], y el nivel medido, L_j [dB], tal y como indica la igualdad A3.3.

$$L_{ideal} = L_j' - L_j \tag{A3.3}$$

2. Detector RMS

El laboratorio de calibración obtiene también la incertidumbre típica asociada a la detección del valor eficaz del sonómetro, $u(\delta_{rms})$ [dB], calculando la desviación típica experimental de dichas desviaciones, haciendo uso de una ecuación análoga a la A3.2 (por lo que se omite su expresión).

3. Calibración eléctrica del nivel de presión sonora

La componente de incertidumbre asociada a esta componente dependerá del propio laboratorio de calibración y del procedimiento de calibración utilizado, y vendrá dada por la ecuación A3.4.

$$u(\delta_{ce}) = \frac{U}{k} \text{ [dB]} \quad (\text{A3.4})$$

donde U es la incertidumbre expandida de calibración eléctrica del laboratorio y k el factor de cobertura, que como hemos venido haciendo hasta ahora, suponemos igual a 2.

4. Calibración acústica del nivel de presión sonora

De forma análoga a la calibración eléctrica, la incertidumbre asociada a esta componente, $u(\delta_{ca})$ [dB], dependerá del propio laboratorio de calibración y del procedimiento de calibración utilizado, y vendrá dada por una ecuación análoga a la A3.4, donde U es la incertidumbre expandida de calibración acústica del laboratorio.

5. Función de ponderación temporal

La incertidumbre típica asociada a esta componente vendrá dada por la expresión A3.5, donde se supone la peor de las distribuciones (rectangular o uniforme) y $L_{ideal\ máx}$ [dB] es la desviación a la característica ideal máxima obtenida.

$$u(\delta_{pt}) = \frac{L_{ideal\ máx}}{\sqrt{3}} \text{ [dB]} \quad (\text{A3.5})$$

6. Resolución finita del display del sonómetro

La incertidumbre típica asociada a la resolución se calculará a través de la expresión A3.6, donde de nuevo, suponemos la peor de las distribuciones (rectangular o uniforme).

$$u(\delta_{res}) = \frac{Resolución}{\sqrt{3}} \text{ [dB]} \quad (\text{A3.6})$$

7. Comprobación inicial del sonómetro utilizando un calibrador acústico

La incertidumbre típica asociada, $u(\delta_{ci})$ [dB], se estimará por medio de una expresión idéntica a la A3.6, ya que también se supone una distribución rectangular o uniforme.

8. Utilización del calibrador acústico sobre su valor certificado

La incertidumbre típica asociada a esta componente, $u(\delta_{ucv})$ [dB], se estimará por medio de una expresión análoga a la A3.4.

9. Variaciones de la temperatura

La contribución de incertidumbre de esta componente se calculará a través de la expresión A3.7, donde se supone una distribución triangular siguiendo la orientación propuesta por la referencia [40].

$$u(\delta_{vt}) = \frac{L_{ideal\ máx}}{\sqrt{6}} \text{ [dB]} \quad (\text{A3.7})$$

10. Variaciones de la presión atmosférica

Del mismo modo que con la temperatura, la incertidumbre típica asociada a esta componente, $u(\delta_{vp})$ [dB], vendrá dada por una expresión idéntica a la A3.7.

11. Carcasa del sonómetro

El aporte de incertidumbre debido a esta componente, $u(\delta_c)$ [dB], se estimará a través de una ecuación análoga a la A3.6 puesto que se supone una distribución rectangular.

12. Directividad del micrófono

En este caso, la incertidumbre típica asociada a esta componente, $u(\delta_{dir})$ [dB], vendrá dada por una fórmula similar a la A3.7, dado que siguiendo la orientación propuesta por la referencia [40], se supone una distribución triangular.

13. Pantalla antiviento

La contribución a la incertidumbre de medida de esta componente, $u(\delta_{pa})$ [dB], se estimará por medio de una expresión similar a la A3.6, puesto que se supone la peor de las distribuciones (rectangular o uniforme).

14. Observador o técnico

La contribución del observador varía con su tamaño, su posición relativa con respecto al sonómetro y es muy dependiente de la frecuencia. El fabricante puede declarar en sus especificaciones el efecto del observador en función de la distancia al sonómetro y su variación con la frecuencia. La incertidumbre típica que se le asocia, $u(\delta_{obs})$ [dB], se estimará por una expresión análoga a la A3.6, ya que una vez más, se supone una distribución uniforme siguiendo la orientación propuesta por el documento [40].

A3.5. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEBIDA A LA INSTRUMENTACIÓN

Hay normativas que estiman todas estas componentes con un solo valor numérico, como es el caso de la referencia [18], que determina que la incertidumbre típica debida a la instrumentación puede aproximarse a 1 [dB]; o como propone el proyecto [41], que considera que la incertidumbre típica debida a la instrumentación puede aproximarse a 0,5 [dB].

Esta circunstancia reduce en gran medida el número de cálculos y permite una exposición clara del análisis de la incertidumbre de medida en un ensayo, tal y como se puede ver a lo largo del Capítulo 4.

Anexo 4

EJEMPLOS DE MEDIDA DE AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO

A4.1. MOTIVACIÓN

El objetivo de este anexo es facilitar la comprensión del concepto de incertidumbre de medida, en medidas de aislamiento a ruido aéreo.

Para ello, se proponen ejemplos reales de medidas de aislamiento a ruido aéreo, donde se facilita una tabla resumen de cada una de las diferentes magnitudes físicas medidas o parámetros calculados, junto con las gráficas obtenidas de los mismos.

Posteriormente, a partir de esta información, se podrá ilustrar en una figura el espectro medido que representa la curva de aislamiento del paramento bajo ensayo, la cual es necesaria para efectuar el método de Montecarlo, tal y como se explica en el apartado 4.5.10 del Capítulo 4.

A4.2. PRIMER EJEMPLO

- Nivel de presión sonora medido en el recinto emisor (L_1)

<i>Frec.</i> [Hz]	<i>Pos.1</i> [dB]	<i>Pos.2</i> [dB]	<i>Pos.3</i> [dB]	<i>Pos.4</i> [dB]	<i>Pos.5</i> [dB]	<i>Pos.6</i> [dB]	<i>Pos.7</i> [dB]	<i>Pos.8</i> [dB]	<i>Pos.9</i> [dB]	<i>Pos.10</i> [dB]	<i>Promedio</i> [dB]
100	96,6	98,0	97,4	98,7	98,6	100,8	100,9	98,9	96,3	100,5	99,0
125	101,7	102,8	101,6	105,7	101,2	103,0	104,4	101,7	104,7	100,8	103,1
160	107,7	106,3	104,3	108,0	105,9	104,1	106,9	107,1	105,4	106,0	106,4
200	107,8	109,9	105,6	107,3	110,8	111,3	111,3	108,8	109,1	108,6	109,4
250	107,5	106,2	108,1	107,2	107,4	110,3	108,5	108,2	107,1	104,6	107,7
315	103,6	104,6	104,3	104,2	106,1	105,7	108,0	104,9	107,3	104,4	105,5
400	105,1	103,4	102,3	104,9	105,2	103,8	104,1	103,7	105,3	102,9	104,2
500	103,3	102,2	102,7	102,1	103,4	104,2	104,2	102,9	103,5	102,4	103,1
630	104,5	102,8	105,3	104,5	103,8	103,9	103,4	103,4	105,3	102,7	104,0
800	103,2	102,8	104,1	103,5	103,5	103,8	103,3	102,0	104,0	102,6	103,3
1000	102,3	102,0	102,3	101,8	101,6	101,9	102,5	102,2	102,9	101,7	102,1
1250	102,3	102,6	103,1	103,1	102,8	102,5	102,9	103,3	102,9	102,8	102,8
1600	102,1	102,2	102,8	101,8	102,3	102,8	103,2	103,3	103,3	102,3	102,6
2000	102,4	102,4	102,7	101,1	102,2	102,4	103,0	102,5	103,0	102,3	102,4
2500	101,0	101,3	101,4	100,4	101,0	100,2	101,5	101,3	101,3	101,1	101,1
3150	99,9	99,3	99,5	98,9	98,6	99,2	99,3	99,4	99,4	99,0	99,3

Tabla A4.1 – Niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto emisor.

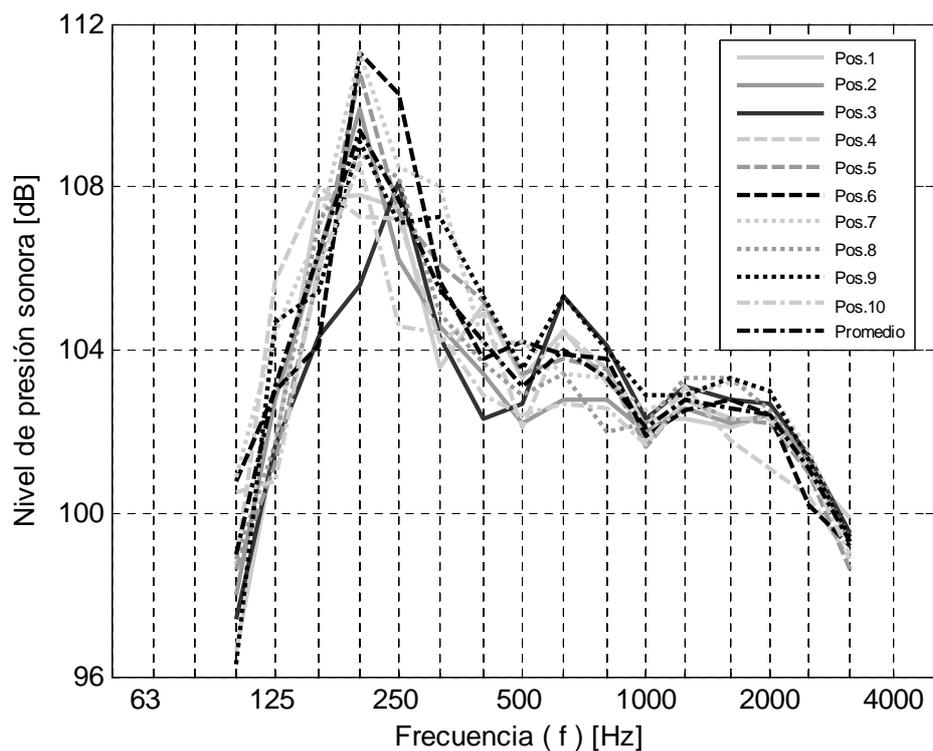


Figura A4.1 – Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto emisor.

• Nivel de presión sonora medido en el recinto receptor (L_2)

<i>Frec.</i> [Hz]	<i>Pos.1</i> [dB]	<i>Pos.2</i> [dB]	<i>Pos.3</i> [dB]	<i>Pos.4</i> [dB]	<i>Pos.5</i> [dB]	<i>Pos.6</i> [dB]	<i>Pos.7</i> [dB]	<i>Pos.8</i> [dB]	<i>Pos.9</i> [dB]	<i>Pos.10</i> [dB]	<i>Promedio</i> [dB]
100	65,9	62,9	60,9	62,6	61,9	61,3	60,1	62,7	62,5	64,2	62,8
125	70,3	67,0	63,2	67,7	65,5	67,2	64,0	63,6	65,8	66,5	66,6
160	70,8	71,7	70,2	69,2	66,9	71,2	71,4	73,3	72,3	72,0	71,2
200	70,8	68,8	69,9	69,3	69,7	70,6	68,0	69,8	71,1	69,3	69,8
250	71,2	71,1	69,3	72,2	71,3	71,5	71,1	71,2	70,8	72,5	71,3
315	70,3	69,8	70,3	71,1	70,9	73,4	72,9	72,5	70,3	72,5	71,6
400	65,7	66,2	66,7	67,6	67,6	66,6	66,0	64,1	66,3	66,1	66,4
500	63,2	63,9	64,7	63,6	64,5	64,0	64,2	64,8	63,3	64,3	64,1
630	62,1	62,1	63,2	62,8	63,0	62,7	64,6	64,7	63,7	64,1	63,4
800	63,0	62,7	61,8	62,1	63,3	62,9	62,8	62,9	63,5	63,1	62,8
1000	61,4	61,0	61,4	60,9	61,3	61,1	61,3	60,8	60,3	60,9	61,1
1250	61,6	61,3	60,9	60,9	60,9	60,7	61,0	60,3	60,6	61,0	60,9
1600	59,9	59,7	60,0	59,3	59,8	59,5	59,8	59,3	59,6	59,7	59,7
2000	56,1	56,2	55,8	55,9	55,9	55,8	55,7	56,1	56,2	56,0	56,0
2500	51,9	52,2	51,9	52,1	52,1	52,0	51,9	52,0	51,6	51,8	52,0
3150	46,6	46,3	46,6	46,4	46,6	46,2	46,4	46,4	46,8	46,5	46,5

Tabla A4.2 – Niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

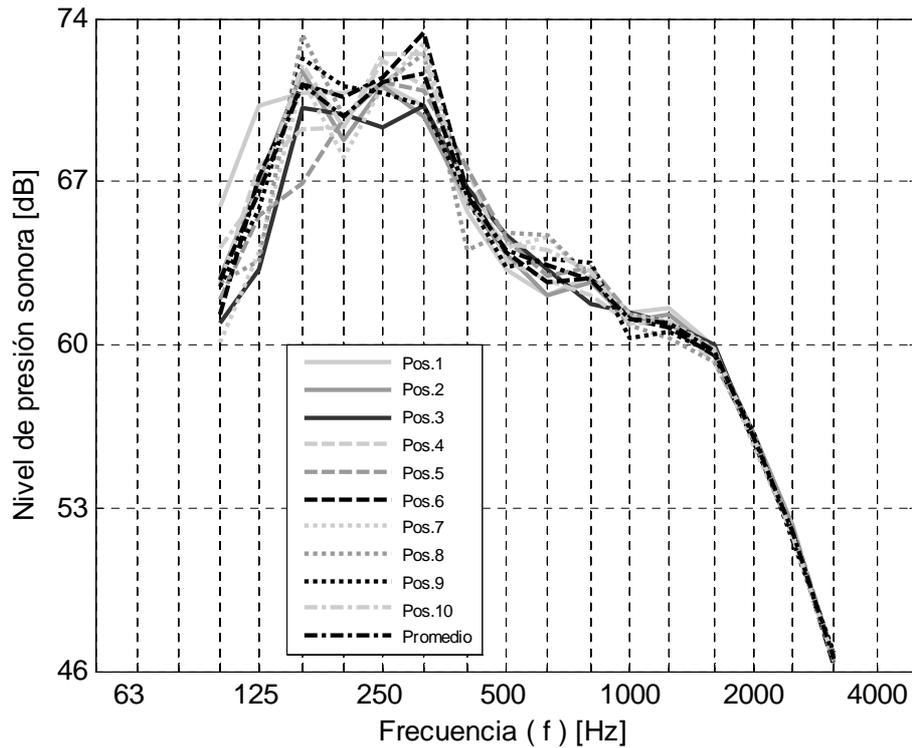


Figura A4.2 – Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

- Nivel de presión sonora del ruido de fondo medido en el recinto receptor (L_{RF})

<i>Frec.</i>	<i>Pos.1</i>	<i>Pos.2</i>	<i>Pos.3</i>	<i>Pos.4</i>	<i>Promedio</i>
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
100	28,8	28,9	36,4	37,3	34,5
125	26,9	28,7	32,0	35,7	32,2
160	27,4	26,6	34,3	35,8	32,7
200	24,8	22,7	32,2	35,4	31,5
250	28,0	24,4	27,8	33,1	29,5
315	23,5	21,5	26,5	31,2	27,3
400	22,5	20,7	23,6	27,2	24,2
500	21,8	15,5	23,7	28,2	24,3
630	19,8	14,5	21,0	26,4	22,4
800	20,1	14,6	20,4	24,6	21,2
1000	19,5	13,2	22,0	23,2	20,8
1250	17,1	11,2	20,1	21,1	18,7
1600	15,4	10,2	19,1	19,2	17,2
2000	14,3	9,3	19,0	26,7	21,7
2500	13,8	8,5	18,5	27,3	22,1
3150	14,0	9,5	17,4	21,4	17,6

Tabla A4.3 – Niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

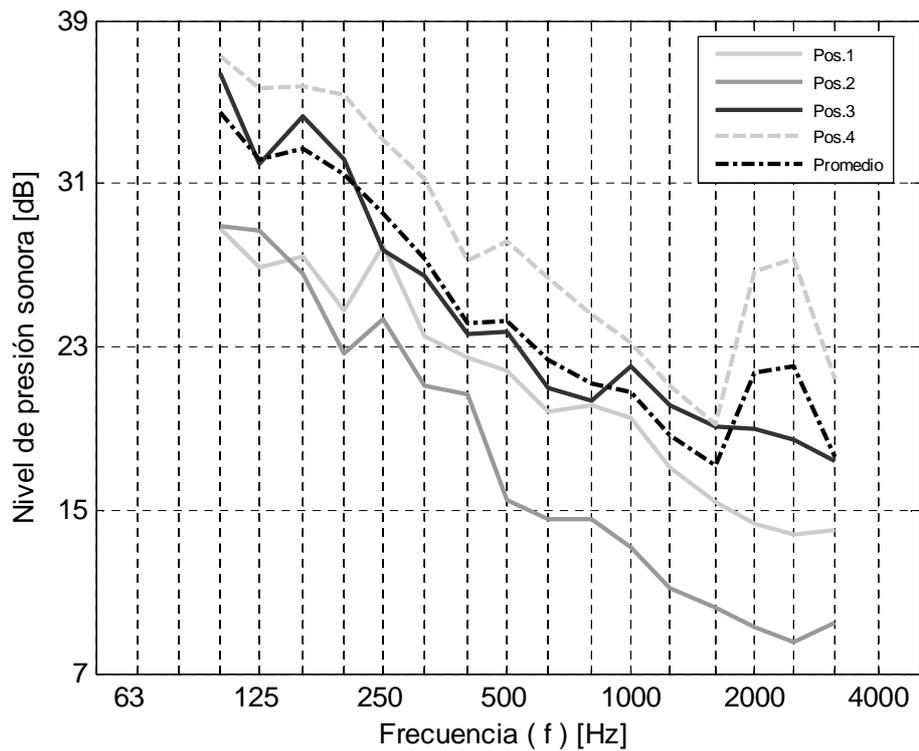


Figura A4.3 – Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

- **Tiempo de reverberación medido en el recinto receptor (T)**

<u>Frec.</u>	<u>Pos.1</u>	<u>Pos.2</u>	<u>Pos.3</u>	<u>Pos.4</u>	<u>Pos.5</u>	<u>Pos.6</u>	<u>Promedio</u>
[Hz]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]
100	1,46	1,52	1,42	1,63	1,36	1,63	1,50
125	1,53	1,60	1,44	1,26	1,44	1,59	1,48
160	1,26	1,26	1,30	1,43	1,43	1,36	1,34
200	1,27	1,38	1,36	1,45	1,06	1,36	1,31
250	1,20	1,20	1,15	1,42	1,29	1,27	1,26
315	1,18	1,05	1,06	1,11	1,14	1,17	1,12
400	1,09	1,14	1,19	1,11	1,09	1,02	1,11
500	1,26	1,25	1,26	1,21	1,18	1,26	1,24
630	1,37	1,32	1,30	1,38	1,36	1,23	1,33
800	1,32	1,31	1,35	1,45	1,34	1,32	1,35
1000	1,39	1,25	1,26	1,32	1,34	1,33	1,32
1250	1,33	1,34	1,38	1,39	1,38	1,35	1,36
1600	1,39	1,37	1,40	1,50	1,32	1,37	1,39
2000	1,43	1,32	1,43	1,45	1,33	1,49	1,41
2500	1,39	1,37	1,33	1,47	1,33	1,36	1,38
3150	1,35	1,38	1,35	1,45	1,30	1,35	1,36

Tabla A4.4 – Tiempos de reverberación medidos en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

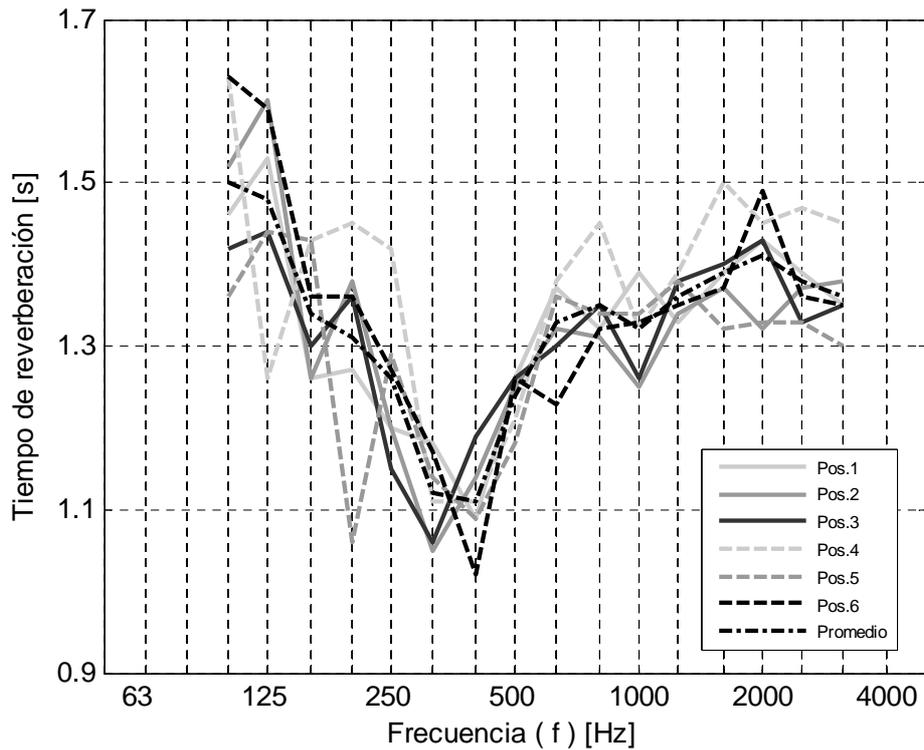


Figura A4.4 – Espectros obtenidos a partir de los tiempos de reverberación medidos en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

A4.3. SEGUNDO EJEMPLO

- Nivel de presión sonora medido en el recinto emisor (L_1)

<u>Frec.</u>	<u>Pos.1</u>	<u>Pos.2</u>	<u>Pos.3</u>	<u>Pos.4</u>	<u>Pos.5</u>	<u>Pos.6</u>	<u>Pos.7</u>	<u>Pos.8</u>	<u>Pos.9</u>	<u>Pos.10</u>	<u>Promedio</u>
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
100	99,8	97,9	94,8	100,8	98,4	101,5	98,7	96,5	101,1	100,2	99,4
125	104,4	100,3	101,7	99,1	103,6	101,4	99,5	103,1	103,0	103,8	102,3
160	107,3	105,6	106,9	105,4	107,6	109,4	105,4	106,8	107,6	109,1	107,3
200	105,3	106,3	109,7	107,8	109,1	108,1	105,7	107,6	107,1	106,2	107,5
250	105,6	106,2	107,5	105,1	106,6	107,0	105,2	107,1	107,5	106,6	106,5
315	103,7	104,9	106,6	104,9	102,4	103,5	105,0	105,6	105,5	105,8	104,9
400	101,8	105,2	104,9	103,1	104,3	103,7	101,8	104,0	104,2	103,1	103,7
500	101,7	102,7	103,1	103,4	102,0	103,1	102,7	103,7	102,0	103,7	102,9
630	102,9	103,5	103,1	104,3	103,4	102,7	103,2	103,8	102,2	104,0	103,3
800	101,7	103,9	103,1	102,5	102,8	103,0	103,1	102,3	102,1	103,0	102,8
1000	102,0	102,2	102,6	101,7	101,8	102,2	101,9	101,1	101,2	101,2	101,8
1250	102,9	102,1	103,1	102,1	103,5	102,9	102,5	103,3	102,1	102,7	102,7
1600	102,2	103,1	103,5	103,2	102,9	102,1	102,6	102,0	102,2	102,8	102,7
2000	102,4	102,7	103,3	103,1	102,8	102,6	102,4	102,0	102,2	102,2	102,6
2500	101,0	101,2	101,1	101,5	101,5	100,7	101,3	100,8	100,4	100,9	101,0
3150	99,0	99,1	99,1	99,9	99,9	99,1	99,4	98,9	98,8	99,6	99,3

Tabla A4.5 – Niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto emisor.

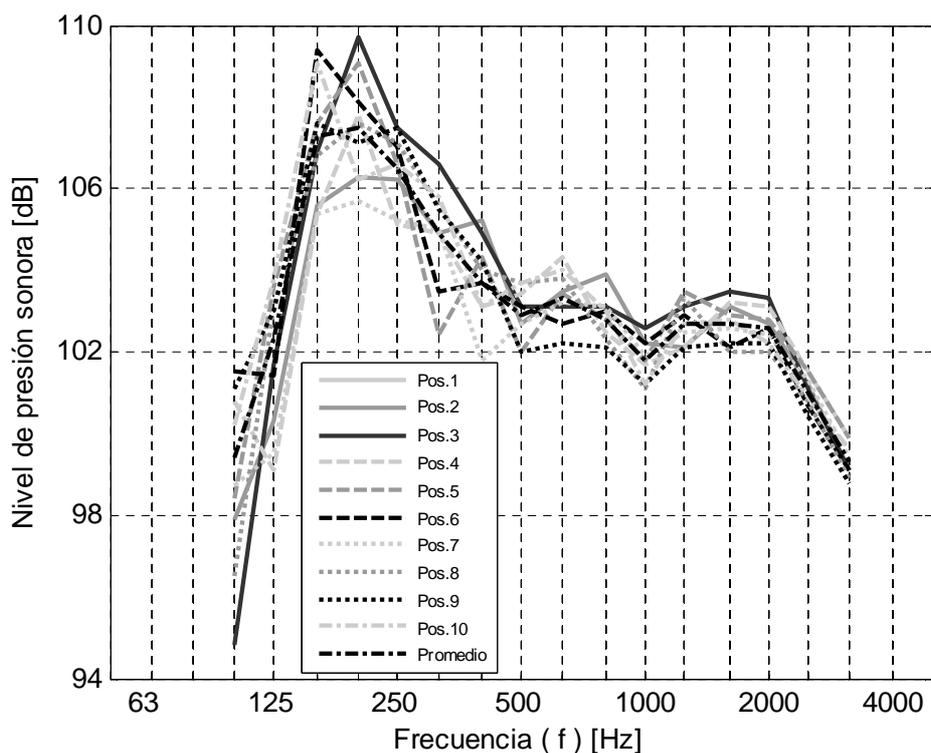


Figura A4.5 – Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto emisor.

• Nivel de presión sonora medido en el recinto receptor (L_2)

<u>Frec.</u> [Hz]	<u>Pos.1</u> [dB]	<u>Pos.2</u> [dB]	<u>Pos.3</u> [dB]	<u>Pos.4</u> [dB]	<u>Pos.5</u> [dB]	<u>Pos.6</u> [dB]	<u>Pos.7</u> [dB]	<u>Pos.8</u> [dB]	<u>Pos.9</u> [dB]	<u>Pos.10</u> [dB]	<u>Promedio</u> [dB]
100	62,6	64,2	66,1	64,1	66,2	63,0	64,0	63,5	62,5	64,9	64,3
125	65,1	63,7	63,6	65,4	67,0	65,8	64,0	62,9	65,1	66,9	65,1
160	69,7	69,5	70,8	69,5	73,9	69,9	69,5	71,2	70,0	74,7	71,3
200	71,0	69,3	68,9	69,1	67,5	70,5	68,0	68,7	69,8	67,6	69,2
250	71,1	71,3	71,9	73,8	71,4	72,8	72,8	73,1	71,3	73,7	72,4
315	71,2	73,3	72,0	70,4	70,2	70,2	71,3	70,4	71,3	70,5	71,2
400	66,4	67,6	68,2	66,5	67,2	68,6	67,9	68,6	66,6	68,5	67,7
500	64,4	63,8	64,1	64,6	63,9	64,7	63,8	65,0	64,8	64,1	64,3
630	64,4	63,6	63,7	64,7	64,3	63,1	63,3	63,7	63,8	64,0	63,9
800	62,4	62,8	63,7	63,2	62,3	62,9	63,0	62,9	62,8	62,1	62,8
1000	62,1	61,4	61,2	61,3	61,2	61,4	61,0	60,8	61,8	61,6	61,4
1250	60,7	60,5	60,7	61,0	60,8	60,6	60,7	61,0	61,1	61,2	60,8
1600	59,3	59,5	59,9	59,0	59,8	59,1	60,1	59,5	59,9	59,7	59,6
2000	56,1	55,8	55,9	56,1	56,4	55,9	55,8	56,1	55,6	55,9	56,0
2500	51,9	52,1	51,4	51,9	51,5	51,4	51,9	51,8	52,0	51,8	51,8
3150	46,1	46,4	46,3	46,3	45,8	46,3	46,0	46,7	46,3	46,3	46,3

Tabla A4.6 – Niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

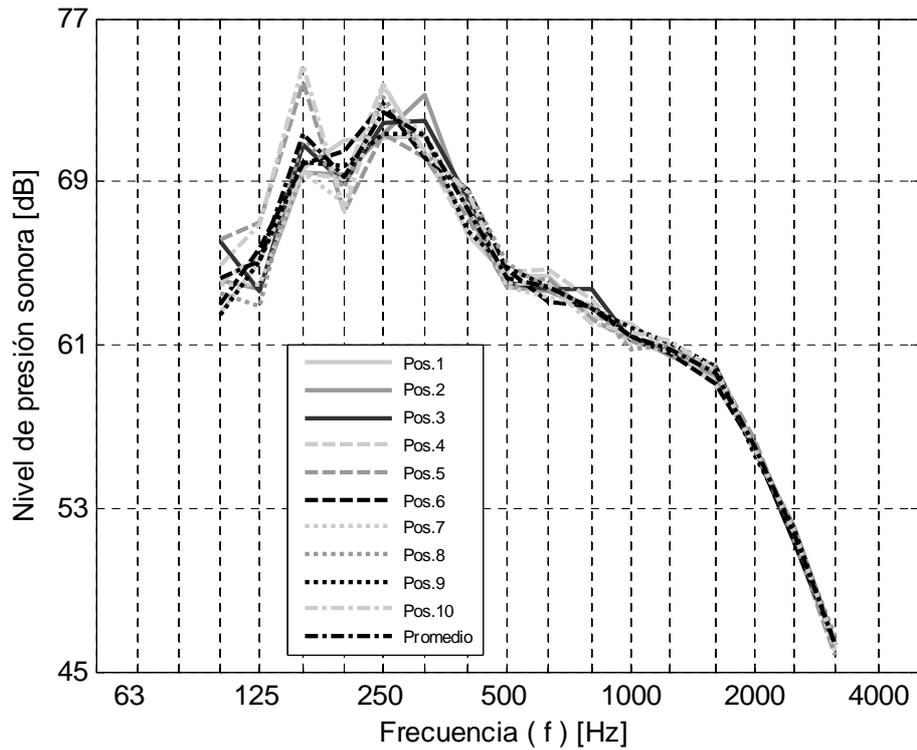


Figura A4.6 – Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

- Nivel de presión sonora del ruido de fondo medido en el recinto receptor (L_{RF})

<u>Frec.</u>	<u>Pos.1</u>	<u>Pos.2</u>	<u>Pos.3</u>	<u>Pos.4</u>	<u>Promedio</u>
[Hz]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
100	57,4	57,3	58,0	58,7	57,9
125	56,6	56,7	60,6	57,6	57,8
160	65,5	58,5	64,8	63,5	63,1
200	61,9	63,5	63,8	60,6	62,4
250	61,5	57,7	54,1	53,1	56,6
315	61,1	55,4	51,8	49,3	54,4
400	50,5	54,8	59,3	59,2	55,9
500	62,0	51,0	56,9	56,7	56,6
630	59,1	51,9	55,8	56,8	55,9
800	57,8	54,5	55,8	58,1	56,6
1000	55,9	57,4	52,9	54,2	55,1
1250	53,9	55,5	49,7	51,9	52,8
1600	48,1	51,5	45,2	49,2	48,5
2000	44,2	46,6	42,4	41,9	43,8
2500	39,1	35,7	31,9	30,1	34,2
3150	26,7	22,3	10,2	9,6	17,2

Tabla A4.7 – Niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

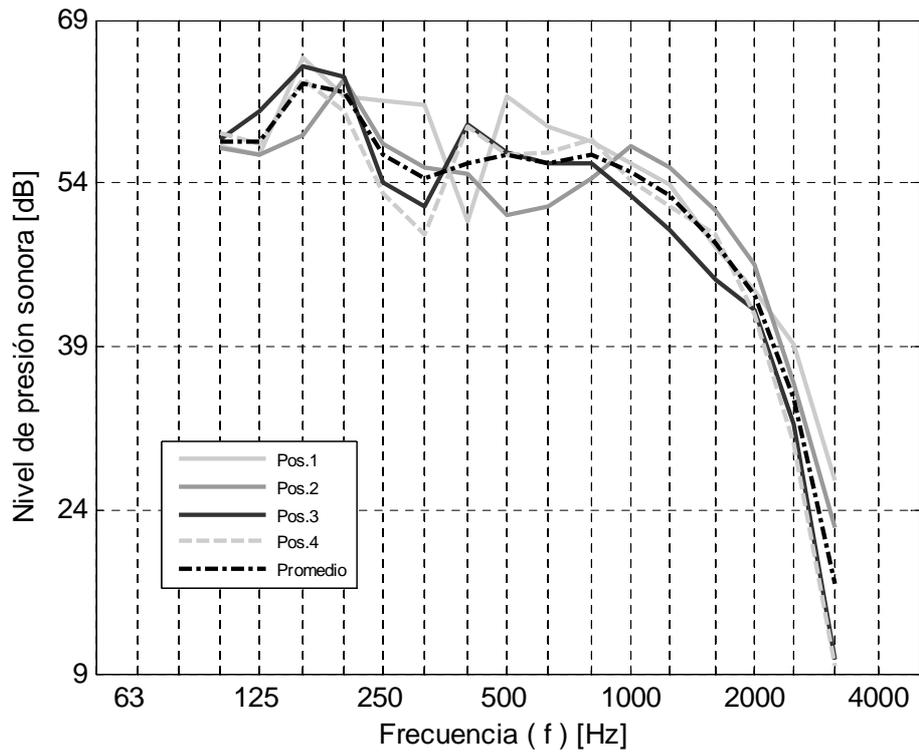


Figura A4.7 – Espectros obtenidos a partir de los niveles de presión sonora registrados en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

- **Tiempo de reverberación medido en el recinto receptor (T)**

<u>Frec.</u>	<u>Pos.1</u>	<u>Pos.2</u>	<u>Pos.3</u>	<u>Pos.4</u>	<u>Pos.5</u>	<u>Pos.6</u>	<u>Promedio</u>
[Hz]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]
100	1,37	1,54	1,5	1,73	1,57	1,62	1,56
125	1,39	1,65	1,53	1,47	1,51	1,47	1,50
160	1,59	1,44	1,57	1,54	1,4	1,29	1,47
200	1,32	1,23	1,27	1,5	1,13	1,38	1,31
250	1,08	1,05	1,11	1,14	1,33	1,41	1,19
315	1,14	1,1	1,11	0,99	0,96	1,17	1,08
400	0,99	0,92	0,93	1,13	1	1,13	1,02
500	1,14	1,1	1,14	1,1	1,08	1,14	1,12
630	1,38	1,31	1,34	1,32	1,24	1,21	1,30
800	1,32	1,33	1,26	1,29	1,37	1,34	1,32
1000	1,46	1,32	1,45	1,31	1,26	1,37	1,36
1250	1,24	1,39	1,38	1,28	1,29	1,3	1,31
1600	1,29	1,32	1,32	1,36	1,31	1,29	1,32
2000	1,31	1,34	1,42	1,28	1,31	1,23	1,32
2500	1,36	1,29	1,34	1,33	1,3	1,22	1,31
3150	1,25	1,25	1,27	1,23	1,27	1,24	1,25

Tabla A4.8 – Tiempos de reverberación medidos en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

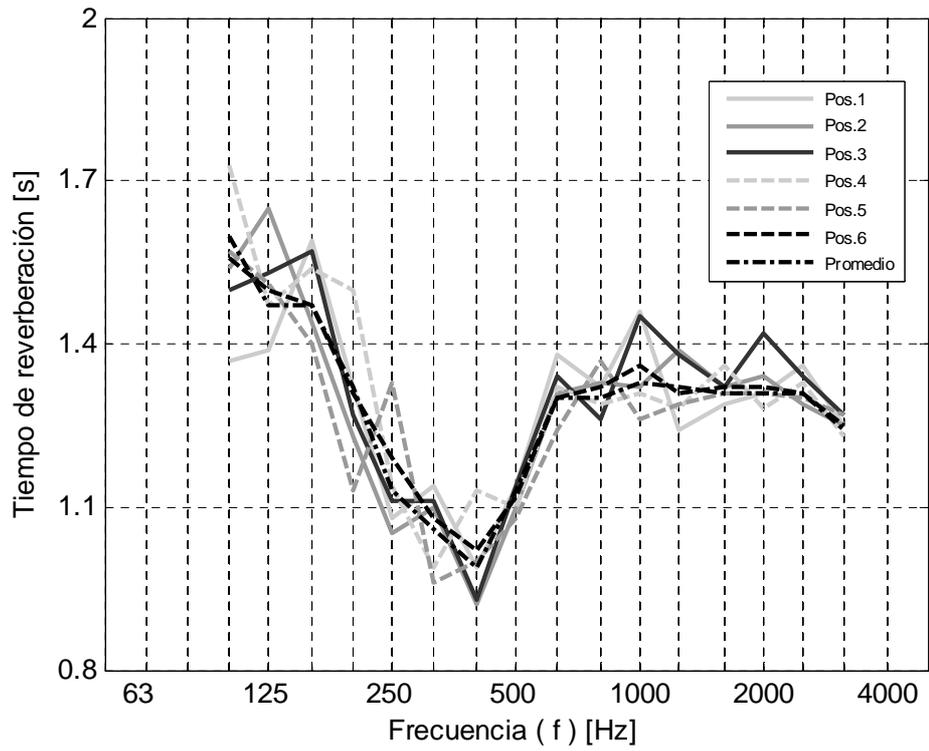


Figura A4.8 – Espectros obtenidos a partir de los tiempos de reverberación medidos en cada una de las posiciones elegidas en el recinto receptor.

