

Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de
Telecomunicación

Certificación de aislamiento a ruido aéreo en
interiores

Autor: María José Tubío Fernández

Tutor: Iván Durán Díaz

Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Certificación de aislamiento a ruido aéreo en interiores

Autor:

María José Tubío Fernández

Tutor:

Iván Durán Díaz

Dep. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Proyecto Fin de Grado: Certificación de aislamiento a ruido aéreo en interiores

Autor: María José Tubío Fernández

Tutor: Iván Durán Díaz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

*A mis padres y mi hermana por
estar siempre ahí*

Agradecimientos

Aquí acaba una etapa de mi vida con la cual he madurado académicamente pero sobre todo personalmente. He conocido a personas increíbles, que me han acompañado a lo largo de estos 5 años y a los cuáles tengo que agradecerles todo su apoyo y ayuda. Tengo que nombrar a mi grupo BLACAAS MIT, sin ellos no hubiera sido lo mismo y a mi CoffeTea&Telepi por estos dos últimos años tan geniales. Por supuesto, agradecerles a mis padres la oportunidad que me han brindado de poder estudiar en Sevilla y por su apoyo incondicional, creyendo siempre en mí y a mi hermana, que me ha apoyado en todo y me ha levantado cuando me caía. Y a mi familia y amigas el haber confiado en mí.

Además, agradecerle a mi tutor, Iván Durán Díaz, por guiarme en este proyecto y a María José Madero por ser tan servicial, sino fuera por ella más de una vez me habría quedado encerrada en la escuela.

María José Tubío Fernández

Sevilla, 2015

En este proyecto hemos descrito los procedimientos de las medidas y los cálculos necesarios para la realización de un certificado de aislamiento acústico a ruido aéreo y determinado si desde el punto de vista acústico, un aula del laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla cumple con los requisitos de aislamiento.

Hemos realizado las mediciones y cálculos que nos exigen las normas vigentes para comprobar el aislamiento acústico entre la sala y el pasillo en bandas de un tercio de octava. Además, hemos desarrollado un procedimiento de medición del tiempo de reverberación de la sala siguiendo la norma UNE-EN ISO específica que rige el cálculo de éste. Y por último, hemos comparado los resultados con las exigencias del Documento Básico Protección frente al ruido del Código Técnico de la Edificación.

Abstract

In this project we have described procedures for measurements and calculations required to carry a certificate of acoustic insulation to airborne noise and determined whether from the acoustic point of view, a classroom lab of the School of Engineering at the University Seville meet the requirements of isolation.

We have performed measurements and calculations that current regulations require us to check the sound insulation between the room and hallway in bands one third octave. In addition, we have developed a method of measuring the reverberation time of the room following the UNE -EN ISO specific rule governing the calculation of this. Finally, we compared the results with the requirements of the Basic Document Protection against noise of the Technical Building Code.

Índice

Agradecimientos	ixx
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xix
Índice de Figuras	xxi
Notación	xxi
1 Motivación y objetivos	1
2 El ruido	2
2.1. <i>Tipos de ruido</i>	3
2.1.1. Caracterización temporal	3
2.1.2. Caracterización frecuencial	4
2.1.3. Según el ambito	5
2.2. <i>Contaminacion acústica y efectos sobre la salud</i>	6
2.3. <i>Fuentes de ruido</i>	8
2.3.1. Internas	8
2.3.2. Externas	8
3 Aislamiento acústico	10
3.1. <i>Tipos de ruido de edificación</i>	10
3.1.1. Ruido aéreo	11
3.1.2. Ruido de impactos	11
3.1.3. Ruido de instalación	12
3.2. <i>Vias de transmisión</i>	12
3.2.1. Directa	12
3.2.2. Indirecta o lateral	12
3.2.3. Parásita	13
3.3. <i>Medición del aislamiento acústico</i>	13
3.4. <i>Índices de aislamiento acústico a ruido aéreo</i>	15
3.4.1. Diferencia de nivel entre recintos	15
3.4.2. Diferencia de nivel normalizada de elementos de construcción pequeños	16
3.4.3. Diferencia de nivel estandarizada entre recintos interiores	16
3.4.4. Diferencia de nivel estandarizada, ponderada A, entre recintos interiores	16
3.4.5. Diferencia de nivel estandarizada en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior	17
3.4.6. Índice de reducción acústica	18
3.4.6.1. Aislamiento acústico de paredes simples	18
3.4.6.2. Aislamiento acústico mixto	19

3.4.7. Índice de reducción acústica aparente	19
3.4.8. Índice de reducción acústica aparente, ponderado A, de un elemento constructivo	19
3.4.9. Relación entre las magnitudes R' y D_{nT}	20
3.5. Valores límite de aislamiento acústico a ruido aéreo	20
3.6. Uso de los índices de aislamiento acústico en relación con las exigencias	26
4 Análisis de la norma UNE-EN ISO 16283-1:2014 Medición "in situ" del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción	27
4.1. Objeto y campo de aplicación	27
4.2. Instrumentación	28
4.2.1. Generador de ruido	28
4.2.2. Altavoz	28
4.2.3. Micrófono y sonómetro	29
4.2.4. Calibrador	30
4.3. Rangos de frecuencia	30
4.4. Generalidades	31
4.5. Procedimiento por defecto para la medición del nivel de presión acústica	31
4.6. Cálculos de los niveles de presión acústica promediados energéticamente	34
4.7. Corrección del ruido de fondo	34
4.8. Registro de resultados	35
5 Análisis de la norma UNE-EN ISO 3382-2:2008 Tiempo de reverberación en recintos ordinarios	36
5.1. Objeto y campo de aplicación	37
5.2. Rangos del tiempo de reverberación	37
5.3. Métodos de medición	37
5.3.1. Método de ruido interrumpido	38
5.3.2. Método de la respuesta impulsiva integrada	38
5.4. Posiciones de medición	38
5.5. Procedimiento de medición del método del ruido interrumpido	39
5.6. Expresión de los resultados	42
5.7. Área de absorción equivalente	42
6 Análisis de la norma UNE-EN ISO 717-1:2013 Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo	43
6.1. Objeto y campo de aplicación	43
6.2. Procedimiento de evaluación de magnitudes globales	44
6.2.1. Cálculo de los términos de adaptación espectral	46
7 Mediciones "in situ" del aislamiento a ruido aéreo	49
7.1. Equipos de medición	49
7.1.1. Generador de ruido y altavoz	49
7.1.2. Sonómetro y micrófono	51
7.1.3. Calibrador	52
7.1.4. Pórtatil y mezclador	52
7.2. Procedimiento empleado	53
7.2.1. Características del recinto	53
7.2.2. Tiempo de reverberación	55
7.2.3. Área de absorción equivalente	61
7.2.4. Ruido de fondo	62
7.2.5. Niveles de presión acústica	62
7.2.6. Índices de aislamiento acústico	68
7.2.7. Índices globales	74
7.3. Soluciones acústicas	78
8 Conclusiones y líneas futuras	80
8.1. Conclusiones	80
8.2. Líneas futuras	81

Referencias	81
Glosario	83
Anexo A. Ponderación frecuencial	84
Anexo B. Resultados	88
Anexo C. Código del cálculo del tiempo de reverberación	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Bandas de frecuencias de octava y tercio de octava	5
Tabla 3-1. Valores del espectro normalizado de ruido rosa, ponderado A	17
Tabla 3-2. Clasificación de usos del edificio y tipo de unidades de uso y recintos protegidos que pueden encontrarse para cada uso del edificio	22
Tabla 3-3. Valores límites de aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos	23
Tabla 3-4. Valores límites de aislamiento acústico a ruido aéreo	24
Tabla 3-5. Valores límites de aislamiento acústico a ruido aéreo exterior	25
Tabla 3-6. Valores límites del tiempo de reverberación	25
Tabla 3-7. Índices implicados en las exigencias de aislamiento frente al ruido aéreo	26
Tabla 4-1. Frecuencias centrales en filtros de bandas de un tercio de octava (Hz)	30
Tabla 4-2. Frecuencias bajas en filtros de bandas de un tercio de octava (Hz)	31
Tabla 4-3. Frecuencias altas en filtros de bandas de un tercio de octava (Hz)	31
Tabla 4-4. Número de posiciones del micrófono y el altavoz	33
Tabla 5-1. Números mínimos de posiciones y mediciones	39
Tabla 6-1. Valores de referencia para aislamiento a ruido aéreo	44
Tabla 6-2. Espectros de nivel sonoro para calcular los términos de adaptación	47
Tabla 6-3. Espectros de nivel sonoro para calcular los términos de adaptación para rangos de frecuencia ampliados	48
Tabla 7-1. Tiempo de reverberación sala receptora. Primer color hace referencia a las posiciones de los micrófonos de la primera posición del altavoz y el segundo al de la segunda posición del altavoz	59
Tabla 7-2. Área de absorción equivalente (m^2)	61
Tabla 7-3. Niveles de presión sonora del ruido de fondo en el recinto receptor, L_b (dB)	63
Tabla 7-4. Niveles de presión sonora del recinto receptor en la primera posición del altavoz, L (dB)	65
Tabla 7-5. Niveles de presión sonora del recinto emisor en la primera posición del altavoz, L (dB)	65
Tabla 7-6. Niveles de presión sonora del recinto receptor en la segunda posición del altavoz, L (dB)	66
Tabla 7-7. Niveles de presión sonora del recinto emisor en la segunda posición del altavoz, L (dB)	66
Tabla 7-8. Índices de aislamiento acústico a ruido aéreo, D_n y D_{nT} en la primera posición del altavoz	68
Tabla 7-9. Índices de aislamiento acústico a ruido aéreo, D_n y D_{nT} en la segunda posición del altavoz	69
Tabla 7-10. Índices de aislamiento acústico totales a ruido aéreo, D_{nTotal} y $D_{nTTotal}$	69

Tabla 7-11. Índice de reducción acústica aparente, R'_1 , en la primera posición del altavoz	71
Tabla 7-12. Índice de reducción acústica aparente, R'_2 , en la segunda posición del altavoz	72
Tabla 7-13. Índice de reducción acústica aparente total, R'_{Total}	72
Tabla 7-14. Resumen de los resultados de la diferencia de nivel estandarizada.	75
Tabla 7-15. Resumen de los resultados del índice de reducción acústica aparente	77
Tabla A.1. Clasificación ponderación frecuencial	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Visor NOISE. Exposición de ruido a nivel europeo	6
Figura 2-2. N° de personas que viven fuera de las aglomeraciones expuestas a ruido por tráfico rodado	7
Figura 2-3. Leyenda. Número total de personas expuestas a niveles superiores a 65dB	7
Figura 3-1. Generación y transmisión de ruido aéreo	11
Figura 3-2. Generación y transmisión de ruido de impacto	11
Figura 3-3. Caminos transmisión del sonido	13
Figura 3-4. Montaje para la medición de aislamiento acústico de una pared entre dos salas	14
Figura 4-1. Amplificador de potencia 2734. Brüel & Kjær	28
Figura 4-2. Fuente dodecaédrica. Brüel & Kjær	28
Figura 4-3. Directividad de la fuente sonora omnidireccional tipo 4282-L. Brüel & Kjær	29
Figura 4-4. Sonómetro. Quest Technologies	29
Figura 4-5. Calibrador acústico. Quest Technologies	30
Figura 4-6. Posiciones del altavoz en el recinto emisor	32
Figura 4-7. Posiciones del sonómetro	33
Figura 5-1. Curva de decrecimiento resultante del promedio, en la frecuencia de 2000Hz.	40
Figura 5-2. Curva representa tiempo de reverberación, T20	42
Figura 6-1. Valores de la curva de referencia para aislamiento a ruido aéreo, en bandas de tercio de octava.	45
Figura 6-2. Valores de la curva de referencia para aislamiento a ruido aéreo, en bandas de octava	45
Figura 7-1. Generador de potencia Brüel & Kjær	50
Figura 7-2. Fuente sonora omnidireccional Brüel & Kjær	50
Figura 7-3. Sonómetro Quest Technologies	51
Figura 7-4. Micrófono Brüel & Kjær	51
Figura 7-5. Calibrador Quest Technologies	52
Figura 7-6. Portátil y mezclador	52
Figura 7-7. Talleres y laboratorios. Escuela Superior de Ingeniería	53
Figura 7-8. Distribución de los talleres y laboratorios. Escuela Superior de Ingeniería	53
Figura 7-9. Distribución de la primera planta de los talleres y laboratorios.	53

Figura 7-10. Plano del aula y del pasillo	54
Figura 7-11. Zonificación de la primera planta del bloque L3	54
Figura 7-12. Dos curvas de decrecimiento que alinearemos	56
Figura 7-13. Resultado obtenido de la alineación de las curvas	57
Figura 7-14. Media de las curvas	57
Figura 7-15. Posición de los micrófonos en la primera posición del altavoz	58
Figura 7-16. Posición de los micrófonos en la segunda posición del altavoz	58
Figura 7-17. Leyenda	58
Figura 7-18. Curvas de decrecimiento alineadas a la izquierda y a la derecha la curva de decrecimiento media en la banda de frecuencia de 500Hz	60
Figura 7-19. Curvas de decrecimiento alineadas a la izquierda y a la derecha la curva de decrecimiento media en la banda de frecuencia de 2000Hz	60
Figura 7-20. Posiciones medición del nivel de fondo	62
Figura 7-21. Posiciones de medición del nivel de presión sonora en la primera posición del altavoz en ambos recintos	64
Figura 7-22. Posiciones de medición del nivel de presión sonora en la segunda posición del altavoz en ambos recintos	64
Figura 7-23. Leyenda	64
Figura 7-24. Espectros de los índices de aislamiento acústico totales a ruido	70
Figura 7-25. Espectro de índice de reducción acústica aparente total	73
Figura 7-26. Curva de referencia y la curva de la diferencia de nivel estandarizada	75
Figura 7-27. Curva de referencia ajustada y la curva de la diferencia de nivel estandarizada	75
Figura 7-28. Curva de referencia y la curva del índice de reducción acústica aparente	76
Figura 7-29. Curva de referencia ajustada y la curva del índice de reducción acústica aparente	77
Figura A-1. Curvas isofónicas	85
Figura A-2. Curvas de ponderación frecuencial. Curva azul es la ponderación A, amarilla la B, naranja la C y negra la D	86
Figura B-1. Diferencia de nivel normalizada junto con la curva de referencia desplazada	89
Figura B-2. Índice de reducción acústica aparente junto con la curva de referencia desplazada	90

NOTACIÓN

α	Coefficiente de absorción acústica
τ	Coefficiente de transmisión de energía
d	Espesor de la pared
f	Frecuencia, [Hz]
f_r	Frecuencia de referencia de valor 1000Hz, [Hz]
Δf	Ancho de banda
f_m	Frecuencia central, [Hz]
f_1	Frecuencia lateral inferior, [Hz]
f_2	Frecuencia lateral superior, [Hz]
m	Masa por unidad de superficie, [kg/m^2]
c	Velocidad de propagación, de valor $3 \cdot 10^8 m/s$, [m/s]
a	Intersección de la recta, [dB]
b	Estimación de la pendiente, [dB]
p	Valor eficaz de la presión acústica, [Pa]
p_0	Presión sonora de referencia, de valor $2 \cdot 10^{-5} Pa$, [Pa]
$p(t)$	Presión acústica den el instante t, [Pa]
P_E	Potencia transmitida a la sala receptora, [W]
P_S	Potencia incidente en la sala receptora, [W]
\tilde{p}_S	Valor efectivo de la presión sonora en sala emisora
\tilde{p}_E	Valor efectivo de la presión sonora en sala receptora
L	Nivel medio de presión sonora en un recinto, [dB]
L_d	Índice de ruido día, [dBA]
L_{den}	Índice de ruido día-tarde-noche, [dB]
L_i	Nivel medio de presión sonora en un recinto en la posición del micrófono i, [dB]
\hat{L}_i	Nivel de la línea de regresión, [dB]
L_1	Nivel de presión acústica promediado energéticamente en el recinto fuente, [dB]
L_2	Nivel de presión acústica promediado energéticamente en el recinto receptor, [dB]
L_S	Nivel promedio de presión acústica en el recinto emisor, [dB]
L_E	Nivel promedio de presión acústica en el recinto receptor, [dB]
L_{sb}	Nivel de la señal y el ruido de fondo del recinto receptor, [dB]
L_b	Nivel de ruido de fondo del recinto receptor, [dB]
A	Área de absorción acústica equivalente, [m^2]
A_0	Área de absorción acústica equivalente de referencia, de valor $10m^2$, [m^2]
C	Término de adaptación espectral del índice de reducción acústica para ruido rosa incidente, [dB]

C_{tr}	Término de adaptación espectral del índice de reducción acústica para ruido de automóviles y ruido de aeronaves, [dB]
D	Diferencia de niveles entre recintos, [dB]
$D_{n,e}$	Diferencia de nivel normalizada de elementos de construcción pequeños, [dB]
D_{nT}	Diferencia de niveles estandarizada entre recintos interiores, [dB]
$D_{nT,i}$	Diferencia de niveles estandarizada en la banda de frecuencia i , [dB]
$D_{nT,j}$	Diferencia de niveles estandarizada para la posición de altavoz j , [dB]
$D_{nT,w}$	Diferencia global de niveles estandarizada, [dB]
$D_{nT,A}$	Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, entre recintos interiores, [dBA]
$D_{2m,nT}$	Diferencia de niveles estandarizada en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior, [dB]
R	Índice de reducción acústica de un elemento constructivo, [dB]
$R_{i,A}$	Índice global de reducción acústica, ponderado A, de cada elemento i , [dBA]
$R_{m,A}$	Índice global de reducción acústica, ponderado A, del elemento constructivo mixto, [dBA]
R'	Índice de reducción acústica aparente de un elemento constructivo medido in situ, [dB]
R'_A	Índice de reducción acústica aparente de un elemento, ponderado A, de un elemento constructivo in situ [dBA]
R'_w	Índice global de reducción acústica aparente, [dB]
R'_i	Índice de reducción acústica aparente en la banda de frecuencia i , [dB]
R'_j	Índice de reducción acústica aparente para la posición de altavoz j , [dB]
S	Área, [m^2]
S_i	Área de cada elemento i , [m^2]
T	Tiempo de reverberación de un recinto, [s]
T_0	Tiempo de reverberación de referencia; su valor es 0,5s, [s]
T_{20}	Tiempo de reverberación que se deriva del tiempo la curva de decrecimiento alcanza primero 5dB y 25dB por debajo del nivel inicial, [s]
T_{30}	Tiempo de reverberación que se deriva del tiempo la curva de decrecimiento alcanza primero 5dB y 35dB por debajo del nivel inicial, [s]
T_{60}	Tiempo de reverberación que deriva del tiempo que tarda en caer la curva de decrecimiento 60dB, [s]
t_i	Tiempo que dura cada una de las frecuencias, [s]
\hat{T}	Tiempo de reverberación estimado en el rango de evaluación T20, [s]
V	Volumen del recinto receptor, [m^3]
W	Potencia acústica, [W]

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

El ruido ha empezado a suponer un problema a lo largo de los años debido a que se ha incrementado a consecuencia de la evolución industrial y tecnológica que han creado fuentes de ruido intenso con las que convivimos a diario como los medios de transportes, las actividades industriales, las instalaciones eléctricas en nuestros hogares, etc. Es importante controlarlo porque puede afectar a la salud y a la calidad de vida de la población.

Como empezó a ser una cuestión importante en la salud ambiental se crearon leyes y normas que regulaban el ruido, exigiendo unos valores límites y definiendo índices que determinaban el nivel de ruido en un lugar determinado y permitían evaluar el aislamiento acústico de los edificios construidos o de nueva edificación. Estas exigencias y normativas siguen vigentes pero han ido cambiando a lo largo del tiempo para optimizar el aislamiento acústico y así mejorar nuestra calidad de vida.

El objetivo de este proyecto es determinar el aislamiento acústico entre recintos ateniéndonos a la legislación actual y a las normas de procedimiento, realizando mediciones in situ de aislamiento acústico y calculando los índices de aislamiento acústico que caracterizan tanto el aislamiento de los recintos como el de los elementos constructivos que los separan. Y desarrollar un sistema para la medición del tiempo de reverberación de una sala debido a que no disponemos de módulos que realizan tal medición en los sonómetros. Además, este parámetro es necesario en la acústica de salas porque determina la reverberación de un recinto. Este fenómeno se deriva de la reflexión del sonido dentro de un espacio cerrado lo que provoca una ligera prolongación del sonido, siendo importante controlarlo porque si no se produciría eco.

En esta memoria, primero se han explicado los conceptos más importantes sobre aislamiento acústico, después se ha analizado cada una de las normas que se debe seguir para realizar un certificado, explicando los procedimientos exigidos por éstas. Se han calculado los parámetros más significativos que caracterizan acústicamente al recinto y se ha explicado el procedimiento seguido para desarrollar el cálculo del tiempo de reverberación. Por último, se han comparado los resultados con las exigencias del Código Técnico de la Edificación (CTE) en el Documento Básico Protección frente al ruido.

2 EL RUIDO

El ruido es un sonido molesto con efectos perjudiciales para la salud humana y la calidad de vida, sin embargo no estamos concienciados con este problema porque nos hemos acostumbrado a convivir con él. Algunos de estos efectos son pérdida auditiva, estrés, pérdida de sueño o distracción entre otros. Por eso es necesario sensibilizar a la población sobre la importancia de controlar el ruido que nos envuelve, ya que si no podríamos llegar a tener problemas más severos.

Por lo tanto podemos definir el ruido como un sonido inhabitual, no deseado, perturbador o dañino, concluyendo que para quien lo recibe es molesto. Sin embargo, además de esta componente objetiva posee una subjetiva, ya que un mismo sonido no tiene por qué ser ruido para todo oyente, depende de la actitud hacia la fuente del ruido y de quien lo perciba. Una persona que produce ruido puede no considerarlo como tal, mientras que sí lo sería para algunas que lo perciben. Supongamos que en un edificio un vecino está escuchando música alta en su casa, para él su música no es ruido, pero para el resto de vecinos, sino les gusta esa música o es de noche, sí.

Por esta necesidad de controlar el ruido, se desarrolló la Ley de Ruido (Ley 37/2003) del 17 Noviembre, la cual traspuso la Directiva Europea 2002/49/CE sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. 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. El ruido carecía hasta entonces de una norma general reguladora de ámbito estatal. Su tratamiento normativo se desdoblaba, a grandes rasgos, entre las previsiones de la normativa civil en cuanto a relaciones de vecindad y causación de perjuicios, la normativa sobre limitación del ruido en el ambiente de trabajo, las disposiciones técnicas para la homologación de productos y ordenanzas municipales que concierne al bienestar ciudadano o al planeamiento urbanístico [1].

Como desarrollo de esta Ley se publican: el Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley en lo que se refiere a la evaluación y gestión de ruido, dando respuesta a la necesidad de la transposición de la Directiva especificando la metodología y contenido de los mapas estratégicos de ruido y planes de acción para su remisión a la Comisión Europea; y el Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. Ese mismo día se publicó el Real Decreto 1371/2007 por el que se aprueba el Documento Básico “DB-HR Protección frente al ruido” del Código Técnico de la Edificación corregido ese mismo año y modificado por el Real Decreto 1675/2008.

El DB-HR tiene por objeto establecer reglas y procedimientos que permiten cumplir las exigencias básicas de protección frente al ruido. Estas exigencias, establecidas en el artículo 14 del Código Técnico de la Edificación (CTE), consisten 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, de impactos y del ruido y vibraciones de las instalaciones propias del edificio, y para limitar el ruido reverberante de los recintos .

El Documento Básico (DB) 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 [2].

Controlar el ruido es de vital importancia, ya que puede ser perjudicial para la salud y llegar a ser un factor grave de contaminación. Por tanto, los certificados de aislamiento acústico son necesarios para garantizar unos niveles mínimos de confort acústico y, si no se cumplen, intentar reducirlos con soluciones de aislamiento acústico.

2.1 Tipos de ruido

El ruido puede ser clasificado atendiendo a su caracterización temporal o frecuencial o según el ámbito donde se produzca el ruido.

2.1.1 Caracterización temporal

Se clasifican según la evolución temporal de la intensidad del ruido en:

- Ruidos aislados (sucesos aislados): Ruidos sin regularidad, que no son habituales, que pueden provocar sobresaltos. Aunque estos pueden ser repetitivos, como el paso de los aviones.
- Ruidos continuos: Ruido cuyo nivel varía sobre márgenes inferiores a 5dB a lo largo del tiempo. Normalmente son ruidos de baja frecuencia producidos por motores, compresores, frigoríficos, etc. Son especialmente molestos para ancianos con sordera de transmisión (no sensorial), ya que perciben mucho las vibraciones. Hay varios tipos de ruidos continuos:
 - Estacionarios: Ruido que permanece relativamente constante en el tiempo.
 - Fluctuantes: El nivel de presión sonora del ruido varía a lo largo del tiempo. Estas variaciones pueden ser periódicas o aleatorias.
 - Intermitentes: La duración de cada suceso es mayor a 5 segundos.
 - Impulsivos: Ruido fluctuante de manera acusada con duración menor a 1 segundo.

2.1.2 Caracterización frecuencial

Según su respuesta frecuencial, es decir, según su espectro, que caracteriza la distribución de amplitudes para cada frecuencia de una señal:

- Ruido blanco: Cuyo espectro es plano, es decir, tiene la misma energía en todas las frecuencias y se usa en acústica como señal de referencia para medir determinadas características de sistemas acústicos.
- Ruido rosa: Su nivel de energía decae a razón de 3dB/octava. Se utiliza como referencia para medidas en que se debe realizar una descomposición de la señal en bandas de octava o fracción de octava como en medidas de aislamiento acústico, potencia sonora, absorción acústica, ecualización de salas, etc.
- Ruido tonal: Su espectro tiene una marcada componente tonal (banda estrecha). Habitualmente son armónicos de la frecuencial fundamental. Pueden llegar a ser muy molestos, como por ejemplo: los ventiladores, los compresores, etc.

El oído distingue las frecuencias según la Ley de Weber-Fechner, ley aplicable a la percepción de estímulos por parte del ser humano:

“El estímulo crece en proporción geométrica y la sensación crece en proporción aritmética”.

Es decir, que la relación entre el estímulo y la sensación percibida no es lineal, sino logarítmica.

$$f_p = k \cdot \log\left(\frac{f}{f_{min}}\right) \quad (2-1)$$

Para medir y estudiar el ruido en distintas bandas de frecuencias se suelen usar filtros de banda proporcional. Éstos son filtros cuya única banda de transmisión se extiende desde una frecuencia lateral inferior mayor que cero, f_1 , a una frecuencia lateral superior finita, f_2 , y su ancho de banda, $\Delta f = f_2 - f_1$, es proporcional a la frecuencia central del filtro. La frecuencia central, f_m , tiene una relación específica con respecto a la frecuencia de referencia (frecuencia de 1000Hz, se simboliza como f_r), de tal manera que el cociente de las frecuencias centrales de las bandas que sean contiguos sea el mismo para todos los filtros [3]. Los dos filtros de banda proporcional más usados son:

- Filtro de octava: Filtro pasa banda cuyo cociente nominal entre la frecuencia lateral superior y la frecuencia lateral inferior es igual a dos.

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (2-2)$$

- Filtro de tercio de octava: Filtro pasa banda cuyo cociente nominal entre la frecuencia lateral superior y la frecuencia lateral inferior es igual al cociente de octava elevado a una potencia igual al indicador de ancho de banda que se aplica, es decir, un tercio.

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/3} \quad (2-3)$$

Estos filtros están regulados en la norma UNE-EN ISO 16260:1997 “Electroacústica. Filtros de banda de octava y de bandas de una fracción de octava”.

Tabla 2.1. Bandas de frecuencia de octava y tercio de octava (Hz)

1/3 octava ($\approx \times \sqrt[3]{2}$)

1 octava ($\approx \times 2$)

1 década ($\approx \times 10$)
($\approx \times 2^{10}$)

31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250
315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000	25000

2.1.3 Según el ámbito

Dependiendo de dónde se produzca el ruido:

- Ruido laboral: Este ruido es el producido en los trabajos por los rotores, engranajes, flujos líquidos turbulentos, procesos de impresión, máquinas eléctricas, motores de combustión interna, equipos neumático, taladros, prensas, estallidos, bombas, compresores, etc. Una exposición continuada a niveles tan altos de ruido puede ser peligroso para el empleado y puede producir daños en el oído no recuperables.
- Ruido comunitario: Ruido producido en el interior de los edificios a causa de la ventilación, los aparatos domésticos, los vecinos y el ruido de conciertos, discotecas, comercio, tráfico, etc.

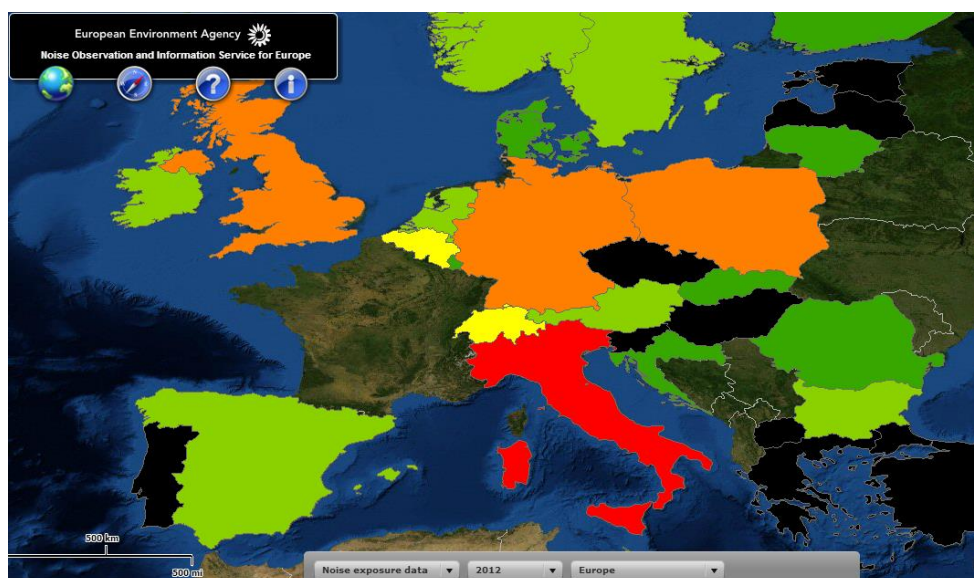
2.2 Contaminación acústica y efectos sobre la salud

La Ley de Ruido (Ley 37/2003) del 17 Noviembre define la contaminación acústica como:

“Presencia en el ambiente de ruidos o vibraciones, cualquiera que sea el emisor acústico que los origine, impliquen molestia, riesgo o daño para las personas, para el desarrollo de sus actividades o para los bienes de cualquier naturaleza, o que causen efectos significativos sobre el medio ambiente.”

La contaminación acústica es uno de los principales problemas medioambientales en Europa. La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) junto con European Topic Centre on Land Use and Spatial Information (ETC LUSI), han desarrollado el primer mapa que muestra la exposición de ruido a nivel europeo denominado visor NOISE¹ (Noise Observation and Information Service for Europe). Éste muestra el número de personas expuestas al ruido provocado por el tránsito aéreo, ferroviario y rodado de Europa y también en 102 aglomeraciones de más de 250.000 habitantes. En la actualidad contienen datos relativos a los mapas estratégicos de ruidos enviados por los Estados miembros conformes con la Directiva Europea 2002/49/CE sobre la evaluación y gestión del ruido [5].

Para mostrar un ejemplo, a continuación podemos ver un mapa de Europa en el cual está indicado la cantidad de personas que está expuesta a niveles de ruido superiores a 65dB durante el día. España está entre unos de los países con menor número de población expuesta a esos niveles, entre 25.800-91.500 habitantes, comparando con otros países como Italia, el país con mayor número de habitantes expuestos, al que le siguen Alemania, Reino Unido y Polonia. Los niveles superiores a los 60dB son los que ya afectan a nuestra salud.



¹ Con el sig **Figura 2.1.** Visor NOISE. Exposición del ruido a nivel europeo L_{den} Total ≥ 65 dB

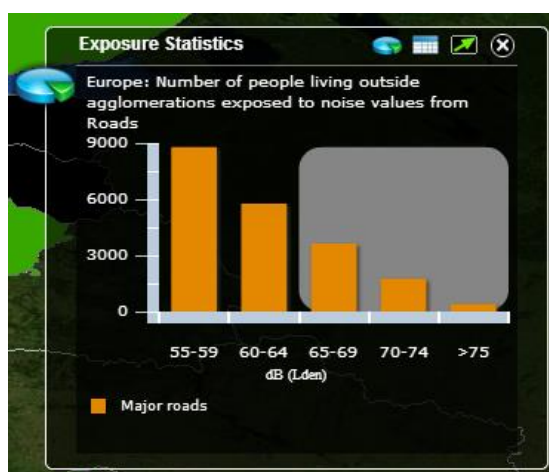


Figura 2.2. Número de personas que viven fuera de las aglomeraciones expuestas a ruido por tráfico rodado.



Figura 2.3. Leyenda. Número total de personas expuestas a niveles superiores a 65dB.

El ruido más importante desde el punto de vista medioambiental es el producido por el tráfico, sin embargo, la mayoría de las denuncias se producen por ocio nocturno, ya que estas son las más molestas. Además, los ciudadanos ven el tráfico como algo necesario y lo aceptan, creyendo que es inevitable y demostrando así la dimensión subjetiva del ruido que comentábamos antes. Aunque el ruido no se acumula, no se traslada de lugar ni se mantiene en el tiempo, como otras contaminaciones, también puede causar efectos importantes sobre la salud y la calidad de vida de las personas si no es controlado. Para evaluar estos efectos hay que tener en cuenta las propiedades físicas del ruido como la exposición sonora (intensidad, duración, frecuencia de aparición, etc.) y los aspectos físicos y psíquicos de quien lo sufre (situación, contexto y características socioculturales como edad, control sobre la fuente sonora, predicción del estímulo acústico, actitud respecto al ruido y su origen) [3].

Los principales efectos del ruido sobre la salud son los siguientes:

- **Físicos:** Éstos afectan a nuestros organismos y sus funciones: aceleración de la respiración y del pulso, aumento de la presión arterial, problemas neuromusculares que ocasionan dolor y falta de coordinación, aumento de la fatiga, alteraciones en la visión nocturna, vértigo, dolores de cabeza, dificultad para dormir, etc. Los ruidos prolongados tanto de bajo o alto nivel de intensidad o los puntuales de alta intensidad, pueden dar lugar a hipoacusia o pérdida de audición temporal o permanente, e incluso sordera total. Los casos graves más habituales son la perforación del tímpano o los daños irreversibles en los sistemas de percepción (pérdida de audición sensorial, neurosensorial, neurológica o perceptiva).
- **Psicológicos:** Estrés, insomnio, irritabilidad, falta de concentración, fatiga, depresión, menor rendimiento en el trabajo, histeria, problemas de memoria, etc. Estos suelen agudizarse más en los niños.
- **Sociales:** Problemas en la comunicación por la pérdida de la inteligibilidad al ser enmascarada la voz

por el ruido. En determinados ambientes como hogares, escuelas y oficinas la existencia de ruido es molesto y en algunos ambientes laborales puede producir posibles accidentes ya que el ruido puede enmascarar algunas indicaciones, alarmas y advertencias.

2.3 Fuentes de ruido

Las fuentes de ruido se caracterizan según su origen, su concentración y su foco. Según su origen pueden ser naturales, fuentes que emiten ruido que no provienen directamente de actividades humanas como el viento, lluvia, mar, etc. o artificiales que se debe a la actividad humana o actividades industriales. Según su concentración se clasifican en fuentes difusas, el ruido proviene de distintas direcciones o puntuales si viene de una sola dirección. Y por último, según su foco, pueden ser internas de los edificios o externas [6].

2.3.1 Fuentes internas

Estas fuentes suelen afectar al propio edificio, controlable por los afectados excepto en algunos casos como locales de ocio, garajes, locales industriales, etc.

El grado de malestar depende de que se trate de fuentes propias (ruidos generados en el propio local) o fuentes ajenas (ruidos generados en otros locales del edificio). Ejemplos de fuentes propias puede ser la fontanería y saneamiento del edificio: bombas de impulsión de agua (hasta 90dB en el local) que produce vibraciones que se transmiten por canalizaciones, estructuras o el propio fluido, conducciones, grifos, llenado y vaciado de aparatos sanitarios (hasta 75dB en el lugar donde se ubica), calderas de calefacción y agua caliente centralizada (entre 70 y 79dB en el recinto); instalaciones eléctricas (fluorescentes o la conmutación de temporizadores y ascensores); transporte vertical (montacargas y ascensores, cuarto de máquinas); o los electrodomésticos como los frigoríficos que llegan a producir 35dB que por el día no son perceptibles pero sí de noche, entre otros. Además podemos incluir en este tipo de fuentes las actividades de las personas como las pisadas, conversaciones (normales llegan a niveles de 50dB y los gritos a 100dB), equipos de reproducción sonora (entre 65-70dB que pueden llegar a los 95dB), instrumentos musicales (entre 90 y 100dB), juego de niños, arrastre de muebles, persianas, perros, etc.

2.3.2 Fuentes externas

Las fuentes externas pueden ser naturales como las descritas anteriormente o artificiales en las cuales profundizaremos un poco más. Éstas suelen ser el tráfico rodado, el de ferrocarriles o aviones principalmente, junto con actividades industriales, comunitarias y de ocio.

El tráfico rodado es la fuente de ruido más importante, la cual se comporta como una sucesión de fuentes puntuales que se aproxima a una fuente lineal indefinida, lineal porque radia su sonido de forma continua a lo largo de un eje e indefinida porque para cada tráfico es distinto (cambia el número de coches, la localización, etc.). Las fuentes de ruido de los automóviles son las rodaduras (a mayor desgaste de neumáticos mayor ruido), calzada rugosa, sus mecanismos (motor, escape, carburador, correa de distribución, ventilación del motor, etc.) y la aerodinámica, es decir, la fricción del aire con el vehículo (importante a más de 80km/h). También depende de la antigüedad y estado de cada automóvil, el mal funcionamiento de algún mecanismo, el tipo de motor, tipo de conducción y el tipo de vehículo: ligero o pesado.

El tráfico de ferrocarriles es localizado y delimitado en el espacio, ya que el medio es guiado. Las causas del ruido son la rodadura (conjunto de ruedas-raíl, rugosidad entre ellas, los deslizamientos tangenciales o chirridos, cruces y cambios de vías, tipo y disposición de vías, soportes, etc.), el sistema mecánico (la unidad tractora o locomotora, las diésel son más ruidosas que las eléctricas, carrocería, etc.) y la aerodinámica. Los niveles de ruido dependen del tipo de tren, de la velocidad, la distancia y la directividad del tren.

Los aviones generan gran cantidad de energía acústica, obteniendo su máximo nivel de ruido en el despegue. Existen grandes molestias en los aeropuertos y alrededores, ya que al ruido de éste hay que añadirle el mantenimiento, servicios y reparaciones.

Los niveles de ruido de las actividades industriales son muy variados porque dependen del proceso industrial, de la edificación de la propia industria y del transporte y acarreo de mercancías. Se intenta evitar la proximidad a las viviendas a causa de que los niveles de ruido rondan los 80dBA.

Las actividades comunitarias como la recogida de basura, colegios, mercados y locales comerciales, el reparto urbano de mercancías, las calles y plazas concurridas pueden llegar a niveles de ruido de 90dBA convirtiéndose también en una importante fuente de ruido.

Y por último, las actividades de ocio necesitan licencias de apertura que garanticen los niveles de ruido aceptables, como discotecas, pubs o locales de ocio.

3 AISLAMIENTO ACÚSTICO

El aislamiento acústico consiste en la protección de un recinto contra el ruido que interfiere a la señal sonora deseada, controlándolo e impidiendo que se transmita de unos recintos a otros o del exterior al interior de los recintos. El exigido en el Documento Básico DB HR es el aislamiento final en la edificación o aislamiento acústico *in situ*. Los índices que lo expresan son magnitudes que pueden obtenerse mediante un ensayo de aislamiento acústico normalizado una vez que el edificio está terminando. El valor de la medición es directamente comparable con el de la exigencia [2].

DB HR distingue distintos tipos en función del origen del ruido que afecta a los recintos del edificio:

- Aislamiento acústico a ruido entre recintos, que puede ser a ruido aéreo o de impactos.
- Aislamiento acústico a ruido exterior, entre fachadas.
- Aislamiento acústico a ruido de medianeras, es decir, de edificios colindantes.

En este proyecto, nos centraremos en la medición *in situ* del aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos.

3.1 Tipos de ruido de edificación

Para reducir las molestias que el ruido pueda producir a los usuarios de un edificio, los elementos constructivos que lo conforman tienen que tener unas características acústicas adecuadas que reduzcan la transmisión del ruido aéreo, el ruido de impactos y el ruido y las vibraciones de las instalaciones propias del edificio.

3.1.1 Ruido aéreo

El ruido aéreo es el que se transmite por el aire al incidir la onda sonora sobre una superficie. El campo sonoro originado incide sobre las superficies, lo que provoca la vibración de los elementos constructivos, transmitiéndose a otras salas y, en ellas, pasan al aire. De esta manera se origina un nuevo foco de emisión sonora.

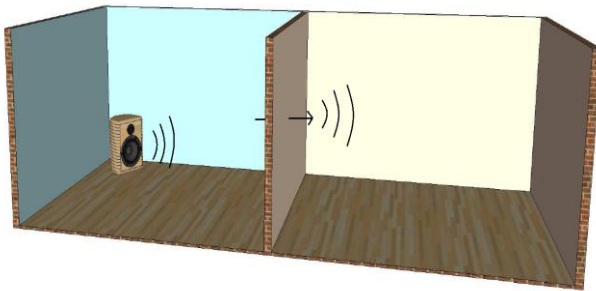


Figura 3.1 Generación y transmisión de ruido aéreo [7].

Por ejemplo, al encender un altavoz las partículas de aire que lo rodean se verán perturbadas, incidiendo en la superficie límite. Ésta superficie entra en vibración, perturbando a su vez las partículas de aire de la sala contigua. Generándose así un nuevo foco de emisión sonora. [7]

3.1.2 Ruido de impactos

El ruido de impacto se origina por una excitación mecánica como un golpe, una pisada o la caída de un objeto sobre el forjado. Los impactos producen unas vibraciones que se propagan por el forjado a los elementos constructivos conectados a éste, como pilares y tabiques, convirtiéndose éstos en fuentes generadoras de ruidos aéreos [2].

Por ejemplo, las pisadas de una persona en el piso superior, al andar sobre el suelo, entran en vibración y éstas pasan al aire del piso inferior.



Figura 3.2 Generación y transmisión de ruido de impacto [7].

3.1.3 Ruido de instalaciones

El ruido de instalaciones es el originado por las instalaciones del propio edificio como ascensores, maquinas, aire acondicionado, etc. Al igual que los ruidos anteriores, el campo sonoro originado por las instalaciones se propaga por el aire, atraviesa las superficies haciéndolas vibrar y estas vibraciones pasan al aire de la sala receptora del ruido. Un ejemplo sería la colocación de un ascensor entre dos viviendas. El hueco del ascensor debe estar correctamente insonorizado para que las vibraciones producidas por el ascensor no se transmitan a las superficies de las viviendas [7].

3.2 Vías de transmisión

La transmisión del sonido no se produce sólo a través de un camino directo. La propagación de la vibración puede seguir muchos caminos, ya que dos elementos constructivos conectados entre sí pueden intercambiar energía vibratoria [4].

Además del camino directo a través de una superficie, existen los caminos laterales o indirectos y los parásitos. No se puede predecir qué vía es más importante, hay que realizar un estudio de aislamiento acústico para poder saberlo.

3.2.1 Directa

La onda sonora atraviesa la superficie de separación de los recintos, fundamentalmente en muros opacos y zonas acristaladas. En estos casos, las ondas que inciden en el elemento constructivo hacen que éste vibre y transmita su deformación al aire del espacio contiguo provocando el *efecto diafragma*. Un ejemplo sería la flecha que va directa de la sala emisora a la receptora denominada *Dd* de la Figura 3.3.

3.2.2 Indirecta o lateral

El ruido provoca la vibración en la pared de separación y en todas las superficies adyacentes convirtiéndolas en fuentes de producción de ruido para el recinto anexo. Indicadas en la Figura 3.3 con las flechas *Fd*, *Ff* y *Df*, todas ellas son caminos indirectos. Estas vibraciones normalmente se producen por el ruido de impactos.

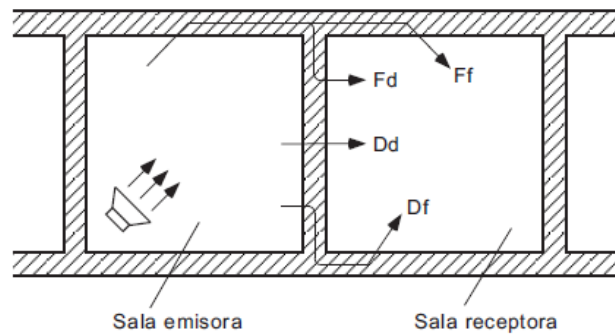


Figura 3.3 Caminos de transmisión del sonido [4].

3.2.3 Parásita

La transmisión se produce a través de los debilitamientos acústicos producidos por las instalaciones y defectos en su ejecución material. Vinculados principalmente a las cajas de persianas, los nichos para radiadores y los huecos dejados por instalaciones en general (rejillas de ventilación, huecos entre los tapajuntas, etc.) [8].

3.3 Medición del aislamiento acústico aéreo

La onda sonora cuando se propaga en un medio elástico como el aire, crea una variación de presión sobre la presión ambiental existente. Esta variación de presión es la que caracteriza a la onda sonora, es decir, al ruido [4]. A ésta la definimos como:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p^2(t) dt} \text{ Pa } (= \text{N/m}^2) \quad (3-1)$$

Siendo $p(t)$ la variación de presión medida en pascales. Pero la medida utilizada para expresar el nivel de presión del ruido es el decibelio. Se usa una escala logarítmica porque la sensibilidad que presenta el oído humano a las variaciones de intensidad sonora sigue una escala logarítmica, no lineal. El rango audible en pascales va de $20\mu\text{Pa}$ a 20Pa , una escala muy grande, y en decibelios de 0dB (umbral de audición) a 120dB (umbral del dolor). Por tanto, para medir el nivel de presión sonora se utiliza la fórmula:

$$SPL \text{ (dB)} = L \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_o^2} \right) = 20 \log \left(\frac{p}{p_o} \right) \quad (3-2)$$

Siendo p_o el valor eficaz de la presión sonora de referencia con valor, definido en la norma UNE-EN ISO 1683:2009: $p_o = 2 \cdot 10^{-5} Pa = 2 \cdot 10^{-5} \frac{N}{m^2} = 2 \cdot 10^{-10} bar$ y p es el valor eficaz de la presión sonora de la onda [3].

Para medir el aislamiento acústico de un elemento se instala entre dos salas, las cuales se designaran una como sala emisora y la otra como sala receptora.

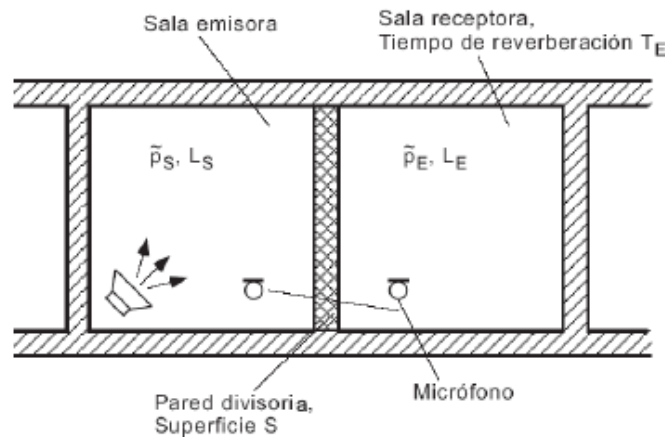


Figura 3.4 Montaje para la medición de aislamiento acústico de una pared entre dos salas [4].

El nivel de presión sonora en una sala no depende sólo de la potencia de la fuente utilizada, también de las características acústicas de la sala. Si usáramos la diferencia entre los niveles en la sala como medida de aislamiento, este número representaría tanto las características de la pared como las de las salas donde se realizó la medición. Por tanto se usa como una medida el coeficiente de transmisión de energía τ .

$$\tau = \frac{P_E}{P_S} \quad (3-3)$$

Representa la relación entre la potencia transmitida a la sala receptora, P_E , y la potencia incidente sobre la pared en la sala emisora P_S . Asumiendo un campo sonoro difuso en ambas salas, la potencia incidente y la potencia transmitida quedan definidas como:

$$P_S = \frac{\tilde{p}_S^2 S}{4\rho c} \quad P_E = \frac{\tilde{p}_E^2 A_E}{4\rho c} \quad (3-4)$$

Donde \tilde{p}_S y \tilde{p}_E es el valor efectivo de la presión sonora en la sala emisora y receptora respectivamente, S la superficie del elemento que queremos medir y A_E es el área de absorción equivalente de la sala receptora. En estado estacionario, la potencia que ingresa a la sala receptora debe ser igual a la potencia absorbida en ella. Por tanto, el coeficiente de transmisión de energía viene dado:

$$\tau = \frac{P_E}{P_S} = \frac{\tilde{p}_E^2 A_E}{\tilde{p}_S^2 S} \quad (3-5)$$

Si pasamos a unidades logarítmicas la inversa del coeficiente de transmisión de energía obtenemos el índice de aislamiento acústico R , que caracteriza acústicamente al elemento constructivo que estamos midiendo.

$$10 \log(\tau) = 10 \log\left(\frac{\tilde{p}_E^2}{\tilde{p}_S^2}\right) + 10 \log\left(\frac{A_E}{S}\right) = L_E - L_S + 10 \log\left(\frac{A_E}{S}\right) \quad (3-6)$$

$$R = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = L_S - L_E + 10 \log\left(\frac{S}{A_E}\right) \quad (3-7)$$

L_S y L_E son los niveles medidos como promedio de cada sala respectivamente. Los promedios se calculan en unidades naturales. El índice de aislamiento acústico depende de la frecuencia, aumentando, en general, al aumentar la frecuencia. Para calcular el área de absorción equivalente usamos la fórmula de Sabine y para ello necesitamos el tiempo de reverberación en la sala receptora. El tiempo de reverberación es un parámetro muy importante en el cálculo de aislamiento acústico. Éste se define como el tiempo necesario para que el nivel de intensidad acústica disminuya 60 decibelios por debajo del valor inicial del sonido, es decir, el tiempo que tarda en hacerse inaudible un sonido en una sala. Y el área de absorción equivalente es la cantidad de energía acústica, en m^2 , absorbida por un objeto. En capítulos posteriores hablaremos del tiempo de reverberación y del área de absorción equivalente. Como ya hemos comentado anteriormente, usaremos como señal acústica un ruido de banda ancha utilizando filtros de octavas o de tercios de octavas, obteniendo así una curva para R . El rango de frecuencias de interés es de 100-3.150Hz. No nos interesan las frecuencias más altas porque el aislamiento es casi total y las frecuencias más bajas a 100Hz porque al ser la respuesta del oído muy brusca, la medición es imprecisa y muy difícil de realizar.

3.4 Índices de aislamiento acústico a ruido aéreo

En el Documento Básico DB HR Protección frente al ruido del Código Técnico de la Edificación vienen definidos los índices de aislamiento acústico a ruido aéreo que se emplean para caracterizar el aislamiento acústico de los recintos y de los elementos constructivos [9].

3.4.1 Diferencia de nivel entre recintos

Diferencia de los niveles de presión acústica promediados energéticamente entre los recintos fuente y receptor, con uno o más altavoces en el recinto fuente.

$$D(dB) = L_1 - L_2 \quad (3-8)$$

Siendo L_1 el nivel de presión acústica promediado energéticamente en el recinto fuente y L_2 el de la sala receptora. Este índice evalúa el aislamiento a ruido aéreo entre recintos y no sólo de los elementos constructivos que se interponen entre ellos. Es necesario para calcular el resto de índices.

3.4.2 Diferencia de nivel normalizada de elementos de construcción pequeños

Diferencia de niveles normalizada, en dB, atribuible a elementos de construcción pequeños. Se calcula mediante la fórmula (3-9).

$$D_{n,e}(dB) = D - 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad (3-9)$$

Donde A es el área de absorción acústica equivalente del recinto receptor que se calcula mediante la fórmula de Sabine, definida en el apartado 5.7 y A_0 es el área de absorción equivalente de referencia, $10m^2$.

3.4.3 Diferencia de nivel estandarizada entre recintos interiores

Esta diferencia de niveles se normaliza a un valor de referencia de tiempo de reverberación en el recinto receptor y se calcula con la fórmula (3-10).

$$D_{nT}(dB) = D + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (3-10)$$

Donde T es el tiempo de reverberación en el recinto receptor y T_0 es el tiempo de reverberación de referencia, 0,5s.

3.4.4 Diferencia de nivel estandarizada, ponderada en A, entre recintos interiores

Este índice es la valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada, entre recintos interiores, D_{nT} , para ruido rosa. Se calcula con la fórmula (3-11).

$$D_{nT,A}(dBA) = -10 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{(L_{Ar,i} - D_{nT,i})/10} \right) \quad (3-11)$$

Siendo $D_{nT,i}$ la diferencia de niveles estandarizada en la banda de frecuencia i , en dB; $L_{Ar,i}$ el valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i , en dBA e i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100Hz a 5kHz. Los valores del espectro normalizado del ruido rosa vienen definidos también en el DB-HR, tabla 3.1.

El espectro normalizado representan, en forma numérica, los valores de presión sonora, ponderados A, correspondientes a ruido rosa normalizado en las frecuencias en bandas de tercios de octavas y de octavas.

Tabla 3.1. Valores del espectro normalizado de ruido rosa, ponderado A[2].

Valores del espectro normalizado de ruido rosa, ponderado A, $L_{Ar,i}$			
f_i (Hz)	$L_{Ar,i}$ (dBA)	f_i (Hz)	$L_{Ar,i}$ (dBA)
100	-30,1	800	-11,8
125	-27,1	1000	-11,0
160	-24,4	1250	-10,4
200	-21,9	1600	-10
250	-19,6	2000	-9,8
315	-17,6	2500	-9,7
400	-15,8	3150	-9,8
500	-14,2	4000	-10
630	-12,9	5000	-10,5

3.4.5 Diferencia de nivel estandarizada en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior

La diferencia entre el nivel del recinto y el exterior viene dada por la fórmula (3-12):

$$D_{2m,nT}(dB) = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (3-12)$$

Siendo $L_{1,2m}$ el nivel medio de presión sonora medido a 2 metros frente a la fachada o a la cubierta, en dB; L_2 el nivel medio de presión sonora en el recinto receptor, en dB; T el tiempo reverberación del recinto, en s y T_0 es el tiempo de reverberación de referencia, 0.5s.

3.4.6 Índice de reducción acústica

Este índice es el demostrado en el apartado 3.3, fórmula (3-7), el cual representa el aislamiento acústico, en dB, de un elemento constructivo medido en laboratorio.

El aislamiento acústico también podemos estimarlo a partir de las propiedades mecánicas de la superficie mediante la Ley de la masa o de Berger [2].

3.4.6.1 Aislamiento acústico de paredes simples

El aislamiento de una pared simple depende sobre todo de su masa por unidad de superficie, su rigidez y el amortiguamiento intrínseco en el material o en los bordes del panel. Al aumentar su masa aumenta el aislamiento, ya que cuanto más pesada es la partición, menos vibra y por tanto radiará menos energía al recinto contiguo. La Ley de masa es una expresión teórica que se usa para predecir el aislamiento de paredes simples y homogéneas únicamente en función de su masa, fórmula (3-13).

$$R(dB) = 20 \log(m \cdot f) - 42 \quad (3-13)$$

Siendo m la densidad de masa por superficie en kg/m^2 , f la frecuencia en Hz. Esta Ley predice que el aislamiento aumentará en 6dB si duplicamos la masa superficial o la frecuencia (6dB/octava). Podemos aumentar la masa aumentando el espesor del material o usando materiales de mayor densidad de masa.

Todos los materiales aíslan menos las bajas frecuencias, que las medias y que las frecuencias altas.

Con la Ley de masas obtenemos un aislamiento acústico aproximado de una partición que no refleja bien su comportamiento real, por tanto, para estar seguros no es suficiente aplicar esta ley sino que es necesario un ensayo acústico del elemento constructivo que queramos medir.

El DB HR determina el aislamiento acústico global de un elemento constructivo a partir de su masa, fórmulas (3-14) y (3-15). Los elementos constructivos formados por elementos blandos a flexión, como particiones de placas de yeso laminado, no responden a estas ecuaciones.

$$R_A(dB) = 16,6 \cdot \log(m) + 5 \quad m \leq 150kg/m^2 \quad (3-14)$$

$$R_A(dB) = 36,5 \cdot \log(m) - 38,5 \quad m \geq 150kg/m^2 \quad (3-15)$$

3.4.6.2 Aislamiento acústico mixto

Un elemento constructivo mixto está formado por dos o más partes de cuantías de aislamiento diferentes hasta cubrir el total de la superficie, como las fachadas con ventanas, puertas, cristalerías, etc., o el de las paredes interiores con puertas. El aislamiento, según la Ley de la masa, se define con la siguiente ecuación:

$$R_{m,A}(dBA) = -10 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} \cdot 10^{\frac{-R_{i,A}}{10}} \right) \quad (3-16)$$

Donde $R_{m,A}$ es el índice global de reducción acústica ponderado A, véase anexo A, del elemento constructivo mixto, $R_{i,A}$ el índice global de reducción acústica ponderado A, de cada elemento i que forma el elemento constructivo mixto, S el área total del elemento constructivo mixto en m^2 y S_i el área del elemento i en m^2 .

3.4.7 Índice de reducción acústica aparente

Este índice también representa el aislamiento acústico, en dB, de un elemento constructivo pero en mediciones in situ.

$$R'(dB) = D + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (3-17)$$

Siendo D la diferencia de nivel entre recintos, S la superficie del elemento que queremos medir y A es el área de absorción equivalente del recinto receptor.

3.4.8 Índice global de reducción acústica aparente, ponderado A, de un elemento constructivo

Valoración global, en dBA, del índice de reducción acústica aparente, R' , para un ruido incidente rosa, normalizado, ponderado A. Se calcula con la fórmula (3-18).

$$R'_A(dBA) = -10 \cdot \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{(L_{Ar,i} - R'_i)/10} \right) \quad (3-18)$$

Siendo R_i el índice de reducción acústica aparente en la banda de frecuencia i , en dB; $L_{Ar,i}$ el valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i , en dBA e i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100Hz a 5kHz. Los valores del espectro normalizado

del ruido rosa son los mismos que el usado en el cálculo de $D_{nT,A}$, apartado 3.4.4, tabla 3.1.

3.4.9 Relación entre las magnitudes R' y D_{nT}

Despejando D de la fórmula (3-17) y sustituyéndola en la (3-10) obtenemos la relación que hay entre la diferencia de nivel estandarizada entre recintos y el índice de reducción acústica aparente.

$$D_{nT}(dB) = R' + 10 \log \left(\frac{0,16 \cdot V}{T_0 \cdot S_s} \right) = R' + 10 \log \left(\frac{0,032 \cdot V}{S_s} \right) \quad (3-19)$$

El área de absorción equivalente del índice de reducción acústica se ha sustituido por la fórmula de Sabine, definida en el apartado 5.7 y S la superficie que queremos medir.

3.5 Valores límite de aislamiento acústico a ruido aéreo

Además, en el DB HR vienen definidos los valores límite que deben de cumplir los recintos y los elementos constructivos interiores de separación, así como fachadas, cubiertas, medianeras y suelos en contacto con el aire exterior, que conforman cada recinto de un edificio. Nosotros nos centraremos en los elementos constructivos interiores de separación.

Dependiendo del tipo de recinto, se exigen unas características u otras. La normativa define seis tipos de recintos [9]:

- Recinto habitable: Recinto interior destinado al uso de personas cuya densidad de ocupación y tiempo de estancia exigen unas condiciones acústicas, térmicas y de salubridad adecuadas. Se consideran recintos habitables los siguientes:
 - a) habitaciones y estancias (dormitorios, comedores, bibliotecas, salones, etc.) en edificios residenciales;
 - b) aulas, salas de conferencia, bibliotecas, despachos, en edificios de uso docente;
 - c) quirófanos, habitaciones, salas de espera, en edificios de uso sanitario u hospitalario;
 - d) oficinas, despachos, salas de reunión, en edificios de uso sanitario u hospitalario;
 - e) cocinas, baños, aseos, pasillos, distribuidores y escaleras, en edificios de cualquier uso;
 - f) cualquier otro con un uso asimilable a los anteriores.
- Recinto protegido: Recinto habitable con mejores características acústicas. Se consideran recintos

protegidos los recintos habitables de los casos a), b), c), d).

- Recinto de actividad: Aquellos recintos, en los edificios de uso residencial (público o privado), hospitalario o administrativo, en los que se realiza una actividad distinta a la realizada en el resto de los recintos del edificio en el que se encuentra integrado, siempre que el nivel medio de presión sonora estandarizado, ponderado A, del recinto sea mayor que 70dBA. Por ejemplo, actividad comercial, de pública concurrencia, etc.
- Recinto de instalaciones: Recinto que contiene equipos de instalaciones colectivas del edificio, entendiéndose como tales, todo equipamiento o instalación susceptible de alterar las condiciones ambientales de dicho recinto. A efectos de este DB, el recinto del ascensor no se considera un recinto de instalaciones a menos que la maquinaria esté dentro del mismo.
- Recinto no habitable: Aquellos recintos no destinados al uso permanente de personas o cuya ocupación, por ser ocasional o excepcional y por ser bajo el tiempo de estancia, sólo exige unas condiciones de salubridad adecuadas. En esta categoría se incluyen explícitamente como no habitables los trasteros, las cámaras técnicas y desvanes no acondicionados, y sus zonas comunes.
- Recinto ruidoso: Recinto, de uso generalmente industrial, cuyas actividades producen un nivel medio de presión sonora estandarizado, ponderado A, en el interior del recinto, mayor que 80dBA.

En el caso en el que en un recinto se combinen varios usos de los anteriores, siempre que uno de ellos sea protegido, a los efectos del Documento Básico se considerará recinto protegido.

Para determinar los valores de aislamiento acústico a ruido interior exigidos es necesario, previamente, zonificar el edificio, es decir, identificar los recintos que no son una unidad de uso, como: recintos de instalaciones, de actividad, ruidosos y otros recintos que no forman parte de ninguna unidad de uso, ya sean zonas comunes, recintos habitables, no habitables o protegidos. El DB HR define *unidad de uso* como un edificio o parte de un edificio que se destina a un uso específico, y cuyos usuarios están vinculados entre sí, bien por pertenecer a una misma unidad familiar, empresa, corporación, o bien por formar parte de un grupo o colectivo que realiza la misma actividad. En cualquier caso, se consideran unidades de uso, las siguientes:

- a) en edificios de vivienda, cada una de las viviendas;
- b) en edificios de uso hospitalario, y residencial público, cada habitación incluidos sus anexos;
- c) en edificios docentes, cada aula o sala de conferencias incluyendo sus anexos.

Una vez zonificado el edificio se procede a clasificar los diferentes recintos del edificio en habitables, no habitables, protegidos y zonas comunes.

Tabla 3.2. Clasificación de usos del edificio y tipo de unidades de uso y recintos protegidos que pueden encontrarse para cada uso del edificio [2].

Uso		Unidades de uso el edificio	Recintos protegidos* del edificio
Residencial	Privado	Vivienda	Habitaciones y estancias
	Público	Habitación (incluyendo sus anexos)	Habitaciones Estancias (comedores, salones, bibliotecas, etc.)
Sanitario	Hospitalario	Habitación (incluyendo sus anexos)	Habitaciones Estancias (salas de espera, despachos médicos, consultas, áreas destinadas al diagnóstico y tratamiento, etc.) Quirófanos
	Resto** (centros de asistencia sanitaria de carácter ambulatorio)	-	Estancias (salas de espera, despachos médicos, consultas, áreas destinadas al diagnóstico y tratamiento, etc.)
Docente		Aulas y salas de conferencias*** (incluyendo sus anexos)	Aulas Estancias (salas de conferencia, bibliotecas, etc.)
Administrativo		Establecimiento**	Estancias (despachos, oficinas, salas de reunión, etc.)
*Los recintos protegidos pueden o no formar parte de la unidad de uso // **Destinados a asistencia sanitaria de carácter ambulatorio (despachos médicos, consultas, áreas destinadas al diagnóstico y tratamiento, etc.) // ***Con independencia de su volumen			

Las exigencias de aislamiento acústico se establecen entre una unidad de uso y cualquier recinto del edificio que no pertenezca a dicha unidad de uso, y entre recinto habitables o protegidos y recintos de instalaciones, de actividad o ruidosos. Estas se aplican tanto a los recintos protegidos como a los habitables colindantes con otro edificio, en contacto con una medianería.

En la tabla 3.3 se resumen los valores límites de aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos. Se ha diferenciado que los recintos de una unidad de uso son los recintos receptores que deben contar con un aislamiento acústico como protección frente al ruido de recintos exteriores a la misma, ya sean recintos de otra unidad de uso, de instalaciones, actividad, etc.

Tabla 3.3. Valores límites de aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos [2].

Recinto emisor exterior a la unidad de uso	Recintos de una unidad de uso	
	Recinto receptor	
	Protegido Ruido aéreo, $D_{nT,A}$ (dBA)	Habitable Ruido aéreo, $D_{nT,A}$ (dBA)
Otros recintos de otra unidad de uso Zona común u otros recintos del edificio** Si no existen puertas entre ambos recintos	50	45*
De instalaciones o de actividad	55	
<p>*Los recintos habitables de una unidad de uso tienen una exigencia de aislamiento acústico menor que las de los recintos protegidos de la misma unidad. Esto no significa que el elemento de separación vertical dispuesto entre recintos habitables pueda ser diferente, de menor espesor o menor aislamiento acústico que el dispuesto entre recintos protegidos. El aislamiento acústico a ruido aéreo depende de, entre otros factores, de las dimensiones de los recintos considerados. Generalmente, los recintos habitables (pasillos, vestíbulos, aseos, baños, cocinas, etc.) tienen menor superficie que los protegidos y por tanto, su aislamiento acústico en la edificación resulta ser menor que el obtenido en los recintos protegidos.</p> <p>**Siempre que este recinto no sea de instalaciones o de actividad</p>		

Estas exigencias se aplican tanto a recintos colindantes verticalmente como a recintos colindantes horizontalmente.

Además, en el DB HR se contemplan situaciones particulares, en las cuales las exigencias de aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{nT,A}$, entre recintos se sustituyen a valores mínimos del índice global de reducción acústica, R_A , para los elementos que constituyen el elemento de separación vertical entre dichos recintos, los cuales vienen recogidos en la tabla 3.4. Sin embargo, estas exigencias corresponden con un índice medido en laboratorio: índice de reducción acústica ponderado A, R_A . Éste es un parámetro de ensayo en laboratorio y no puede verificarse mediante una medición in situ. Pero podemos guiarnos por estas exigencias para el índice medido in situ, R'_A .

Tabla 3.4. Valores límites de aislamiento acústico a ruido aéreo [2].

Valores límite de aislamiento acústico a ruido aéreo					
		Recintos Protegidos		Recintos habitables	
Entre recintos	Misma unidad de uso	$R_A \geq 33dBA$ Tabiquería		$R_A \geq 33dBA$ Tabiquería	
	Distinta unidad de uso	Sin puertas y ventanas	Puertas y ventanas comunes	Sin puertas y ventanas	Puertas y ventanas comunes
		$D_{nT,A} \geq 50dBA$	$R_A \geq 30dBA$ Puertas o ventanas	$R_A \geq 50dBA$ Cerramiento opaco	$D_{nT,A} \geq 45dBA$
	$R_A \geq 50dBA$ Cerramiento opaco		$R_A \geq 50dBA$ Cerramiento opaco		
Recintos de instalaciones o de actividad	$D_{nT,A} > 50dBA$		$D_{nT,A} \geq 45dBA$	$R_A \geq 30dBA$ Puertas	$R_A \geq 50dBA$ Cerramiento opaco
Exterior	Del exterior	$D_{2m,nT,Atr} \geq \text{Valores tabla 2.2}^*$		No es aplicable	
Entre edificios	$D_{2m,nT,Atr} \geq 40dB^{**}$ ó $D_{nT,A} \geq 50dB^{***}$				

*El aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{2m,nT,Atr}$, entre un recinto protegido y el exterior no será menor que los valores indicados en la tabla 2.2, en función del uso del edificio y de los valores del índice de ruido de día L_d .

**Requisito para el aislamiento acústico a ruido aéreo de cada uno de los cerramientos de la medianería entre dos edificios.

*** Requisito para el aislamiento acústico a ruido aéreo correspondiente al conjunto de los dos cerramientos.

Las exigencias entre un recinto y el exterior afectan a las fachadas, cubiertas y a los suelos en contacto con el exterior. Éstas se aplican solamente a los recintos protegidos del edificio, sean o no pertenecientes a una unidad de uso en edificios de uso residencia, hospitalario, sanitario, cultural, docente y administrativo. Se determinan en función del nivel de ruido existente en la zona donde se ubica el edificio mediante el índice de ruido durante el período día, L_d , entre las 07.00h-19.00h, como podemos ver en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Valores límites de aislamiento acústico a ruido aéreo exterior [9].

Valores límite de aislamiento acústico a ruido aéreo exterior $D_{2m,nT,Atr}$				
L_d (dBA)	Uso del edificio			
	Residencial y hospitalario		Cultural, sanitario, docente y administrativo	
	Dormitorios	Estancias	Estancias	Aulas
$L_d \leq 60$	30	30	30	30
$60 < L_d \leq 65$	32	30	32	30
$65 < L_d \leq 70$	37	32	37	32
$70 < L_d \leq 75$	42	37	42	37
$L_d > 75$	47	42	47	42

Nota: El aislamiento acústico a ruido aéreo exterior no será menor que estos valores.

Para limitar el ruido reverberante en las zonas comunes los elementos constructivos, los acabados superficiales y los revestimientos que delimitan una zona común de un edificio de uso residencial público, docente y hospitalario colindante con recintos protegidos con los que comparten puertas, tendrán la absorción acústica suficiente de tal forma que el área de absorción acústica equivalente, A , sea al menos $0,2m^2$ por cada metro cúbico del volumen del recinto. Los recintos deben cumplir un tiempo de reverberación límite, tabla 3.6.

Tabla 3.6. Valores límites del tiempo reverberación.

Valores límite del tiempo de reverberación, T		
Recintos		Tiempo de reverberación (s)
Aulas y salas de conferencias vacías cuyo volumen sea menor que $350 m^2$	Sin ocupación y sin mobiliario	$T \leq 0,7$
	Incluyendo total de butacas	$T \leq 0,5$
Restaurantes y comedores vacíos		$T \leq 0,9$

3.6 Uso de los índices de aislamiento acústico en relación con las exigencias

En el caso de que se realicen mediciones in situ para comprobar las exigencias de aislamiento acústico a ruido aéreo, la valoración de resultados de las mediciones se realizará conforme a las definiciones de diferencia de niveles estandarizada.

En la tabla 3.7 se describen las magnitudes implicadas en las exigencias de aislamiento frente al ruido aéreo con la indicación de los procedimientos y normas de medición y valoración global, para las distintas situaciones tipo de aislamiento en función del ruido incidente implicado.

Tabla 3.7. Índices implicados en las exigencias de aislamiento frente al ruido aéreo.

Situación tipo de aislamiento	Ruido incidente o dominante en el exterior	Magnitud	Norma de medición	Magnitud de valoración global
Entre recintos interiores	Rosa	D_{nT}	UNE EN ISO 140-4	$D_{nT,A}$
Entre recintos y el exterior	Ferroviario	$D_{2m,nT}$	UNE EN ISO 140-5	$D_{2m,nT,A}$
	Automóviles Aeronaves			$D_{2m,nT,Atr}$

Aunque en el DB HR viene definidas las mediciones a partir de la norma UNE EN ISO 140, ésta fue sustituida por la norma UNE-EN ISO 163286, la cual está vigente actualmente.

4 ANÁLISIS NORMA UNE-EN ISO 163286-1:2014 MEDICIÓN IN SITU DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO EN LOS EDIFICIOS Y EN LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN. PARTE 1: AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO

Las medidas de aislamiento acústico pueden realizarse por procedimientos en laboratorios o *in situ*, es decir, en los edificios ya construidos. Estos procedimientos están normalizados por las Normas UNE-EN ISO. Nosotros hemos analizado la Norma UNE-EN ISO 163286-1:2014 “Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo”.

Esta norma, publicada en Septiembre del 2014, reemplazó a la norma ISO 140-4 “Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición in situ del aislamiento al ruido aéreo entre locales”. En ella se define la metodología de ensayo y el cálculo de las propiedades de aislamiento acústico en mediciones in situ para ruido aéreo.

4.1 Objeto y campo de aplicación

El objeto de esta norma es determinar el aislamiento acústico a ruido aéreo entre dos recintos en un edificio usando mediciones de presión acústica. Estos procedimientos están destinados a volúmenes de recintos que van desde 10 a 250m³ en el rango de frecuencias desde 50-5000Hz. Nosotros nos centramos en el rango de frecuencias 100-3150Hz. Los resultados de ensayo se pueden usar para cuantificar, evaluar y comparar el aislamiento acústico a ruido aéreo en recintos vacíos o amueblados donde el campo acústico puede o no aproximarse a un campo difuso. El aislamiento acústico a ruido aéreo medido depende de la frecuencia y se puede transformar en un único valor que lo caracterice usando los procedimientos descritos en la norma ISO 717-1, la cual analizaremos en el apartado 6 [10].

4.2 Instrumentación

Los instrumentos para medir los niveles de presión acústica, incluidos los micrófonos, cables, pantallas antivientos, dispositivos de grabación y los demás accesorios deben ser de clase 0 o 1, de acuerdo con la norma IEC 61672-1. Y los filtros de octava y de bandas de una fracción de octava también deben cumplir los requisitos para instrumentos de clase 0 o 1, de acuerdo con la norma IEC 61260.

El cumplimiento de los requisitos del instrumento de medición de nivel de presión acústica, de los filtros y del calibrador acústico, se debe verificar mediante un certificado de conformidad válido. Si procede, se debe verificar la respuesta de incidencia aleatoria del micrófono mediante algún procedimiento incluido en la norma IEC 61183. Todos los ensayos de conformidad deben estar realizados por un laboratorio acreditado o autorizado a nivel nacional a realizar los ensayos y calibraciones [10].

4.2.1 Generador de ruido

Para generar una señal de ruido de banda ancha, ruido rosa o blanco, usamos un amplificador de potencia que contiene un generador de ruido interno. A partir de los controles de regulación y los indicadores de nivel podemos conseguir el nivel de salida que necesitamos. El selector de sensibilidad en pasos de 10dB permite al amplificador adaptarse a una variedad de niveles de señal de la fuente de sonido.



Figura 4.1. Amplificador de potencia 2734. Brüel & Kjær

4.2.2 Altavoz

El altavoz debe ser una caja cerrada que contenga uno o más altavoces, los cuales deben radiar en fase. La directividad de los altavoces debe tener una radiación omnidireccional y uniforme.

Es preferible escoger un altavoz dodecaédrico ya que emiten la radiación que exige la norma. También se puede usar un altavoz poliédrico semiesférico montando directamente sobre el suelo, aunque esto excluirá las mediciones verticales. En nuestro ensayo, hemos usado una fuente dodecaédrica como la de la figura 4.2.



Figura 4.2. Fuente dodecaédrica. Brüel & Kjær.

El altavoz tiene que cumplir unos índices de directividad, DI, para confirmar que es válido para las mediciones. El procedimiento para calcularlos viene descrito en la norma, pero normalmente todos los altavoces cumplen esos índices, indicado por el fabricante en el manual de instrucciones.

Para bandas de un tercio de octava, los altavoces tienen una radiación omnidireccional uniforme si los valores DI se sitúan dentro de $\pm 2dB$ para el rango de frecuencias desde 100Hz a 630Hz, $\pm 5dB$ para 800Hz y $\pm 8dB$ para el rango de frecuencias de 1000Hz a 5000Hz. Como podemos comprobar en la figura 4.3, para la fuente dodecaédrica usada, se cumplen los índices de directividad.

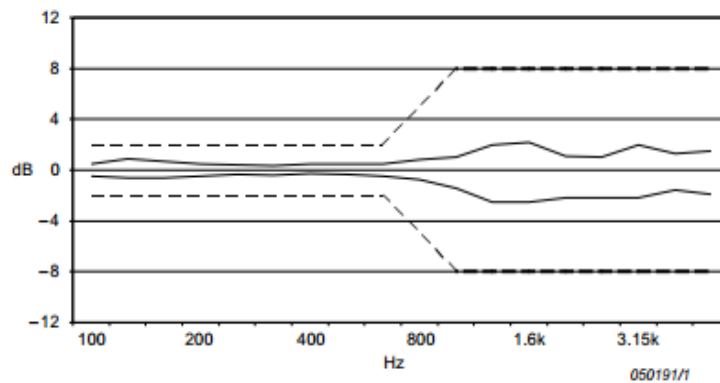


Figura 4.3. Directividad de la fuente sonora omnidireccional tipo 4282-L. Brüel & Kjær [11].

4.2.3 Micrófono y sonómetro

Un sonómetro es una combinación de un micrófono, un preamplificador, un procesador de señal y un dispositivo de presentación de resultados. Las especificaciones de funcionamiento están descritas en la norma UNE-EN 61672-1:2014 “Electroacústica. Sonómetros. Parte 1: Especificaciones”.



Figura 4.4. Sonómetro.

El procesador de señal incluye las funciones combinadas de un amplificador con una respuesta en frecuencia especificada y controlada de un dispositivo para formar el cuadrado de la señal de presión acústica variable en el tiempo y ponderada en frecuencia, y de un integrador temporal o de un promediador temporal. Este procesado está integrado en el sonómetro [12].

Existen tres tipos, el sonómetro convencional que tiene ponderación temporal exponencial, el promediador-integrador y el integrador, aunque uno mismo puede proporcionar las tres funciones. Según sea el tipo de sonómetro debe cumplir unos requisitos mínimos. Un sonómetro convencional debe proporcionar un medio para indicar niveles de sonido con ponderación frecuencial A y ponderación temporal F (fast), un sonómetro integrador-promediador debe proporcionar un medio para

indicar niveles de sonido con ponderación A promediados temporalmente y el sonómetro integrador debe proporcionar un medio para indicar niveles de exposición sonora con ponderación A. Las ponderaciones están definidas en el anexo A.

El sonómetro almacena los resultados de la medición y los puede representar tanto en el dispositivo como en el ordenador mediante un software asociado.

4.2.4 Calibrador

Se debe comprobar en su totalidad el sistema de medición del nivel de presión acústica a una o más frecuencias por medio de un calibrador acústico que debe cumplir con los requisitos para instrumentos de clase 0 o 1, de acuerdo con la norma IEC 60942, al principio y al final de cada sesión de mediciones y al menos al principio y al final de cada día de mediciones. Sin realizar ningún otro ajuste, la diferencia entre las lecturas de las dos comprobaciones consecutivas debe ser inferior o igual a 0.5dB. Si se supera este valor se deberían rechazar los resultados de las mediciones obtenidas con posterioridad a unas que hayan sido satisfactorias anteriormente. Las calibraciones deben realizarse sin ponderación frecuencial. [10].



Figura 4.5. Calibrador acústico. Quest Technologies.

4.3 Rangos de frecuencia

Todas las magnitudes se deben medir usando filtros en bandas de un tercio de octava conteniendo, al menos, las siguientes frecuencias centrales:

Tabla 4.1. Frecuencias centrales en filtros de bandas de un tercio de octava (Hz)

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------

En el rango de frecuencias bajas, se usan los filtros en bandas de un tercio de octava con las frecuencias centrales:

Tabla 4.2. Frecuencias bajas en filtros de bandas de un tercio de octava (Hz)

50	63	80
----	----	----

Y para altas frecuencias, se usan los filtros en bandas de un tercio de octava con las frecuencias centrales:

Tabla 4.3. Frecuencias altas en filtros de bandas de un tercio de octava (Hz)

4000	5000
------	------

Las mediciones de información en los rangos de bajas y altas frecuencias son opcionales, si se realizan sería información complementaria.

4.4 Generalidades

La determinación del aislamiento a ruido aéreo requiere escoger dos recintos, uno como recinto fuente, en el que se encuentra el altavoz, y otro como recinto receptor. Las mediciones requeridas incluyen los niveles de presión acústica en ambos recintos con la fuente en funcionamiento, el ruido de fondo en el recinto receptor cuando todas las fuentes están apagadas y los tiempos de reverberación en el recinto receptor. El cálculo del tiempo de reverberación lo detallaremos en el capítulo 5.

En la norma se describen dos procedimientos de medición que se deben usar para el nivel de presión acústica, el tiempo de reverberación y el ruido de fondo: un procedimiento por defecto y un procedimiento complementario de baja frecuencia. Nosotros nos centraremos en el primero, el procedimiento por defecto.

Este procedimiento consiste en usar un micrófono fijo o un micrófono sujeto manualmente, el cual se desplazada de una posición a otra, un conjunto de micrófonos fijos, un micrófono con un movimiento continuo mecanizado o realizar un escaneado manual con un micrófono en ambos recinto para medir los niveles de presión acústica. Estas mediciones se realizan en la zona central del recinto, en una posición alejada de los límites del mismo. Para medir el ruido de fondo, el operario que controla el micrófono debe decidir si es conveniente estar presente en el recinto para poder escuchar el ruido de fondo intermitente o fuera del recinto para garantizar que el ruido de fondo no se vea afectado por el operador [10].

4.5 Procedimiento por defecto para la medición del nivel de presión acústica

Las mediciones del nivel de presión acústica se usan para determinar el nivel promedio en la zona central del recinto fuente y el recinto receptor con el altavoz encendido, y el nivel del ruido de fondo en el recinto receptor cuando el altavoz está apagado.

La elección del recinto fuente y el recinto receptor depende del volumen de cada recinto. Si los recintos tienen volúmenes diferentes, se debe escoger el recinto de mayor volumen como el recinto fuente, excepto si uno de los recintos tiene un volumen simple bien definido, por ejemplo un recinto en forma de caja, y el otro tiene una geometría más compleja, se debe usar el primero como recinto receptor, o cuando el altavoz esté colocado a una distancia suficiente del suelo para prevenir una excitación significativa del suelo por parte del sonido directo.

En el recinto fuente se debe generar el sonido con la fuente dodecaédrica. La potencia acústica del altavoz debería ser lo suficientemente alta para que el nivel de presión acústica en el recinto receptor esté por encima del nivel del ruido de fondo. Además debe ser estable y tener un espectro continuo sobre el rango de frecuencias usando una señal de ruido de banda ancha, en nuestro caso, ruido rosa.

El nivel de presión acústica promediado energéticamente en el recinto fuente no debe presentar diferencias de más de 8dB entre las bandas de un tercio de octavas adyacentes, al menos por encima de 100Hz.

La distancia entre los límites del recinto y el altavoz debe ser al menos de 0,5m y 1,0m cuando el límite es el elemento de separación. Ésta se debe medir desde el límite hasta el centro del altavoz lo más cercano al primero. Las distancias entre las diferentes posiciones debe ser como mínimo 0,7m y dos posiciones deben estar a 1,4m la una de la otra. Las diferentes posiciones del altavoz no se deben colocar dentro de los planos paralelos a los límites del recinto, estando al menos 0,7m el uno del otro. La base del altavoz debe estar a más de 1,0m por encima del suelo como podemos ver en la figura 4.6.

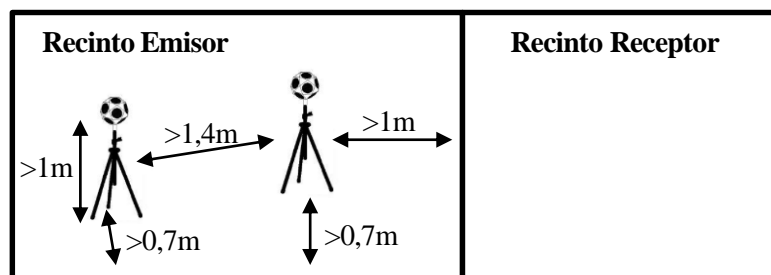


Figura 4.6. Posiciones del altavoz en el recinto emisor.

La norma indica que los micrófonos fijos se pueden usar sin la presencia de un operador en el recinto, haciendo uso de un micrófono fijado a un trípode, o estando éste presente en el recinto, con el micrófono fijado a un trípode o usando directamente un micrófono manual en una posición fija. En ambos casos, el tronco del cuerpo del operador debe permanecer a una distancia de al menos un brazo. Nosotros para realizar el ensayo estuvimos presente en el recinto y usamos el sonómetro fijado a un trípode.

Cuando usamos un único altavoz, se debe realizar un mínimo de cinco posiciones de micrófono en cada recinto por cada posición del altavoz. No debe haber dos posiciones de micrófono en el mismo plano respecto a los límites del recinto. La distancia, entre los límites del recinto y los micrófonos, debe ser al menos 0,5m. Entre el micrófono y el altavoz debe haber 1,0m de distancia y entre ellos 0,7m, como podemos ver en la figura 4.7.

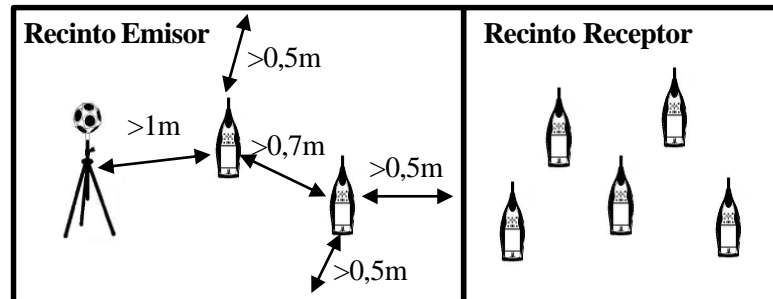


Figura 4.7. Posiciones de los sonómetros.

El tiempo de promediado para cada posición de micrófono debe ser al menos 6s en el rango de frecuencias de 100-400Hz. Para el rango de 500-5000Hz, se puede reducir el tiempo a no menos de 4s y para 50-80Hz, el tiempo de promediado debe ser mayor a 15s.

El número de posiciones recomendado del altavoz y del micrófono viene determinado por el área del suelo en los recintos fuentes y receptor.

Tabla 4.4. Número de posiciones del micrófono y el altavoz.

Área del suelo m^2	Número de posiciones			
	Altavoces (recinto fuente)	Posiciones del micrófono fijas o de mano	Posiciones del micrófono de movimiento continuo mecanizado	Posiciones del micrófono de barrido manual
< 50	2	5 (10)*	1 (2)*	1 (2)*
50 a 100	2	10 (10)*	2 (2)*	2 (2)*

*Los números entre paréntesis indican el total de mediciones del nivel de presión acústica que se tienen que realizar en el recinto.

Si el recinto es menor de $50m^2$, el número mínimo de posiciones del altavoz es 2 y para micrófonos fijos es 5 posiciones pero son necesarias 10 mediciones. Si el recinto está entre 50 a $100m^2$, que es nuestro caso, el número mínimo de posiciones de altavoz es 2 y para micrófonos fijos 10 posiciones. Por tanto, nosotros hemos realizado 10 medidas en distintas posiciones por cada posición de altavoz.

Por todo ello, medimos el nivel de presión acústica tanto en el recinto fuente como en el receptor para la primera posición del altavoz y calculamos el nivel de presión acústica promediado energéticamente en ambos recintos. Se realiza cualquier corrección para el ruido de fondo que se ha comentado en el apartado 4.7. Para esta posición del altavoz, calculamos la diferencia de nivel normalizada (fórmula 3-9) o el índice de reducción aparente (fórmula 3-7). Se repite el proceso para las otras posiciones del altavoz. Y por último calculamos la diferencia de nivel normalizada total o el índice de reducción acústica aparente usando las fórmulas siguientes respectivamente:

$$D_{nT}(dB) = -10 \log \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m 10^{-D_{nT,j}/10} \right) \quad (4-1)$$

$$R'(dB) = -10 \log \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m 10^{-R'_j/10} \right) \quad (4-2)$$

Siendo m el número de posiciones del altavoz, $D_{nT,j}$ la diferencia estandarizada para la *jésima* posición de altavoz y R'_j el índice de reducción aparente para la *jésima* posición de altavoz [10].

4.6 Cálculo de los niveles de presión acústica promediados energéticamente

Para mediciones con un único altavoz, el nivel de presión acústica promediado energéticamente tanto en el recinto fuente como en el recinto receptor se determina:

$$L(dB) = 10 \log \left(\frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{np_0^2} \right) \quad (4-3)$$

Siendo $p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2$ las presiones acústicas cuadráticas medidas en n diferentes posiciones del micrófono en el recinto y p_0 es la presión acústica de referencia igual a $20\mu\text{Pa}$.

En la práctica, se miden los niveles de presión acústica y el nivel de presión acústica promediado energéticamente haciendo uso de la fórmula (4-4).

$$L(dB) = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right) \quad (4-4)$$

Siendo L_1, L_2, \dots, L_n los niveles de presión acústica en n diferentes posiciones del micrófono en el recinto.

4.7 Corrección del ruido de fondo

El ruido de fondo, según la norma, es el nivel de presión acústica medido en el recinto receptor debido a todas las fuentes, como el ruido procedente del exterior del recinto de ensayo, el ruido eléctrico en el sistema receptor, las interferencias eléctricas entre los sistemas fuente y receptor, los dispositivos mecánicos usados o los operadores fuera del recinto de ensayo, excepto el altavoz, en el recinto fuente.

Para garantizar que el nivel de señal en el recinto receptor no esté afectado por el ruido de fondo se deben realizar mediciones de los niveles de fondo y así poder corregirlo en los niveles de presión acústica. Los tiempos de promediado mínimos deben cumplir los requisitos anteriormente descritos. Si el ruido de fondo no es estable y continuo se debe usar tiempos más largos que los mínimos.

El nivel del ruido de fondo debe ser al menos 6dB² por debajo del nivel de señal junto con el ruido de fondo a cada banda de frecuencia. Si la diferencia de niveles es inferior a 10dB pero superior a 6dB, se calcula las correcciones del nivel de presión acústica promediado usando la fórmula (4-5).

$$L(dB) = 10 \log \left(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right) \quad (4-5)$$

Siendo L el nivel de señal ajustado, L_{sb} el nivel de la señal y el ruido de fondo combinados y L_b el nivel de ruido de fondo. Los valores para L_{sb} y L_b se deben reducir a una posición decimas antes de usar la formula (4-5). Cogemos el valor en decimas de un dB lo más cercano a los valores declarados de tal forma que XX,XYZZZ... se redondea a XX,X si Y es inferior a 5 y a XX,X+0,1 si Y es igual o mayor a 5.

Si la diferencia en niveles es inferior o igual a 6dB en cualquiera de las bandas de frecuencia, se usa la corrección 1,3dB fórmula (4-6). Si se usa esta corrección, se debe indicar claramente en el informe, indicando que los valores están en el límite de la medición [10].

$$L(dB) = L - 1,3 \quad (4-6)$$

4.8 Registro de resultados

Para la certificación del aislamiento acústico a ruido aéreo del elemento de ensayo, los resultados de las mediciones deben indicarse en decibelios en todas las frecuencias a una posición décima, tanto en forma de tabla como en forma de curva, detallado en el capítulo 6. El formato de plantilla preferido para los gráficos se muestra en el anexo B.

² Aunque preferiblemente más de 10dB.

5 ANÁLISIS NORMA UNE-EN ISO 3382-2:2008 TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN RECINTOS ORDINARIOS

En los recintos, el sonido se propaga en todas direcciones en forma de ondas que rebotan en todas las superficies produciéndose numerosas reflexiones. Éstas producen un nivel sonoro suplementario que provoca que el sonido recibido aumente. Este fenómeno de persistencia de la energía sonora en el espacio se conoce como reverberación, el cual se mide a partir del tiempo de reverberación que es el periodo de tiempo requerido para que la densidad de la energía acústica media en un recinto decrezca en 60dB una vez que la emisión de la fuente ha cesado.

Por tanto, es un parámetro importante en los cálculos de aislamiento acústico ya que el nivel de presión acústica de las fuentes sonoras, la inteligibilidad de la palabra y la percepción de la privacidad en un recinto dependen mucho del tiempo de reverberación. Además, se mide para determinar el término de corrección de la absorción del recinto y asimismo, como hemos visto en capítulos anteriores, el tiempo de reverberación es necesario tanto para calcular los índices de aislamiento acústico, como la diferencia de nivel estandarizada y el índice de reducción acústica aparente.

Las medidas del tiempo de reverberación deben realizarse siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN ISO 3382-2:2008 “Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios”. Con esta norma, la Organización Internacional de Normalización (ISO) espera contribuir en hacer entender la importancia del tiempo de reverberación para la calidad y el uso del recinto. A continuación haremos un pequeño análisis de ésta.

5.1 Objeto y campo de aplicación

Esta norma especifica los métodos de medición del tiempo de reverberación en recintos ordinarios. Describe el procedimiento de medición, el equipo, el número de posiciones de medición requerido y el método para evaluar los datos y presentar el informe de ensayo.

Los resultados de la medición se pueden usar para la corrección de otras mediciones acústicas, como por ejemplo, el nivel de presión acústica de las fuentes sonoras o las mediciones de aislamiento acústico, y para comparar los requisitos del tiempo de reverberación en los recintos [13].

5.2 Rangos del tiempo de reverberación

Como hemos comentado en la introducción, el tiempo de reverberación es el periodo de tiempo que tarda en caer la curva de nivel de presión sonora 60dB, T60. Por la dificultad de obtener un rango de caída tan elevado, esta norma define dos rangos de evaluación inferiores a 60dB: 20dB y 30dB. Se denota como T20, el tiempo de reverberación si se deriva del tiempo en el que la curva de decrecimiento alcanza primero 5dB y 25dB por debajo del nivel inicial. Y como T30 si se usan valores de decrecimiento entre 5dB y 35dB por debajo del nivel inicial. Nosotros usamos el rango de evaluación T20 porque es el rango que tiene preferencia descrito en la norma por diversas razones [13]:

1. La evaluación subjetiva de la reverberación está relacionada con la primera parte del decrecimiento del sonido.
2. Conviene usar la primera parte del decrecimiento, para estimar el nivel acústico estacionario de un recinto a partir de su tiempo de reverberación.
3. La relación señal/ruido representa normalmente un problema en las mediciones de campo, y a veces es difícil o imposible obtener un rango de evaluación de más de 20dB. Esto requiere un nivel de señal/ruido al menos 35dB.

5.3 Métodos de medición

En la norma se describen dos métodos para medir el tiempo de reverberación, dependiendo del tipo de señal de excitación de la sala: el método de ruido interrumpido y el método de la respuesta impulsiva integrada. Ambos métodos tienen el mismo valor teórico.

5.3.1 Método de ruido interrumpido

El método de ruido interrumpido consiste en la obtención de las curvas de decrecimiento del nivel de presión sonora de una sala mediante la excitación de la misma con un ruido eléctrico de banda ancha aleatorio, es decir, ruido blanco o ruido rosa. Normalmente usamos ruido rosa por tener un nivel espectral constante por bandas de $1/n$ octavas. Se excita la sala hasta que ésta alcanza el estado estacionario, momento en el que detenemos la fuente y recogemos la caída de nivel. El nivel en estado estacionario debe estar entre 35 a 45dB por encima del nivel de fondo para garantizar la medida del tiempo de reverberación de la sala.

Nosotros usaremos este método para calcular el tiempo de reverberación, a partir de la fuente dodecaédrica que genera ruido rosa.

5.3.2 Método de la respuesta impulsiva integrada

El método de la respuesta impulsiva integrada obtiene las curvas de decrecimiento del nivel de presión sonora de una sala mediante la excitación de la misma con un impulso o delta de Dirac. A partir de éste y mediante la integración inversa de la respuesta de la sala al cuadrado para cada banda de octava o tercio de octava. Como es imposible generar una delta perfecta, se usan burst, barridos sinusoidales o secuencias de longitud máxima (MLS-Maximum Length Sequence) para excitar la sala. En este método, el nivel en estado estacionario, también, debe estar entre 35 a 45dB por encima del nivel de fondo para garantizar la medida del tiempo de reverberación de la sala.

5.4 Posiciones de medición

Dependiendo de la exactitud que deseemos, existen tres métodos para decidir el número de mediciones para medir el tiempo de reverberación: el método de control, el método de ingeniería y el método de precisión. La principal diferencia entre ellos es el número de posiciones de medición y por tanto el tiempo requerido para realizar las mediciones.

- Método de control: Este método es apropiado para evaluar la cantidad de absorción del recinto con fines de control de ruido, y para las mediciones de control del aislamiento a ruido aéreo y a ruido de impactos. Las mediciones de control se realizan únicamente en bandas de octava.
- Método de ingeniería: Es adecuado para la verificación del comportamiento de los edificios con respecto al tiempo de reverberación o de la absorción del recinto.
- Método de precisión: Se usa cuando se requiere una alta precisión de medición.

En la tabla 5.1 descrita en la norma, se indican los números mínimos de posiciones de medición para obtener una cobertura adecuada en un recinto. En recintos con una geometría complicada, se deberían usar más posiciones de medición.

Tabla 5.1. Números mínimos de posiciones y mediciones.

	Control	Ingeniería*	Precisión
Combinaciones fuente-micrófono	2	6	12
Posiciones de la fuente**	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Posiciones de micrófono***	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Número de decrecimientos en cada posición (método del ruido interrumpido)	1	2	3

*Cuando el resultado se usa para un término de corrección en otras mediciones de nivel de ingeniería, solo se requiere una posición de la fuente y tres posiciones de micrófono.

**Para el método del ruido interrumpido, se puede usar simultáneamente fuentes no correlativas.

***Para el método del ruido interrumpido y cuando el resultado se usa para un término de corrección, se puede usar una percha de micrófono rotativo e lugar de múltiples posiciones de micrófonos.

Como nosotros hemos realizado un ensayo de aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos, se ha usado el método de control para calcular el tiempo de reverberación, por tanto, el número mínimo de combinaciones fuente-micrófono debe ser 2, el número de posiciones de la fuente mayor o igual a 1 y el de posiciones de micrófono mayor o igual a 2.

El rango de frecuencias específicas debería al menos cubrir 250-2000Hz para el método de control. Para los métodos de ingeniería y precisión, 125-4000Hz en bandas de octava o 100-5000Hz en bandas de un tercio de octava.

5.5 Procedimiento de medición del método de ruido interrumpido

Antes de medir hay que tener en cuenta una serie de condiciones. Una de ellas es el número de personas presentes ya que puede influir en el tiempo de reverberación. Lo ideal sería medir el tiempo de reverberación en un recinto sin personas, pero se permite hasta dos personas que represente su estado vacío. Si el resultado de la medición se usa para la corrección de un nivel de presión acústica medido, el número de personas presentes en el recinto debería ser el mismo para esa medición. El micrófono debe ser lo más pequeño posible y tener un diámetro de

diafragma máximo de 14mm, aunque también se permite micrófonos con diámetros de hasta 27mm si tienen respuesta en presión o en campo libre, siempre y cuando se suministre un corrector de incidencia aleatoria. El tiempo de promediado, es decir, la constante de tiempo de un dispositivo promediador exponencial debe ser inferior pero lo más cercano a $T/30$ y si el dispositivo es promediador lineal deber ser inferior a $T/12$, siendo T el tiempo de reverberación que se esté midiendo.

Dependiendo de los métodos antes descritos en el apartado 5.3, la duración de la excitación del recinto varía. Para los métodos de ingeniería y de precisión, la duración debe ser suficiente para que el campo acústico alcance un estado estacionario antes de apagar la fuente. Es esencial, emitir el ruido durante al menos $T/2s$ y en recintos grandes deber ser al menos unos segundos. Para el método de control, podemos usar una excitación corta o una señal impulsiva como alternativa a la señal de ruido interrumpido.

El procedimiento de medición del método de ruido interrumpido consiste en realizar el número de mediciones requeridas para obtener las curvas de decrecimiento, hacer un promedio de ellas y así obtener el tiempo de reverberación a partir del método de ajuste de mínimos cuadrados. El promedio se puede calcular de dos formas [13]:

1. Hallando los tiempos de reverberación individuales para todas las curvas de decrecimiento y tomando el valor medio.
2. Haciendo una media del conjunto de los decrecimientos de presión acústica al cuadrado y hallando el tiempo de reverberación de la curva de decrecimiento resultante. Los decrecimientos individuales se superponen sincronizando sus orígenes. Los valores muestreados de la presión acústica discreta al cuadrado se suman para cada incremento del intervalo de tiempo de los decrecimientos y la secuencia de estas sumas se utiliza como un decrecimiento único del conjunto a partir del cual se evalúa T . Es importante que la potencia acústica de la fuente sea idéntica para todas las mediciones. Nosotros hemos usado esta forma ya que este es el método preferido.

Una vez obtenida la curva promedio, un ejemplo podemos verlo en la figura 5.1, calculamos el tiempo de reverberación a partir del método de ajuste de mínimos cuadrados que explicaremos a continuación.

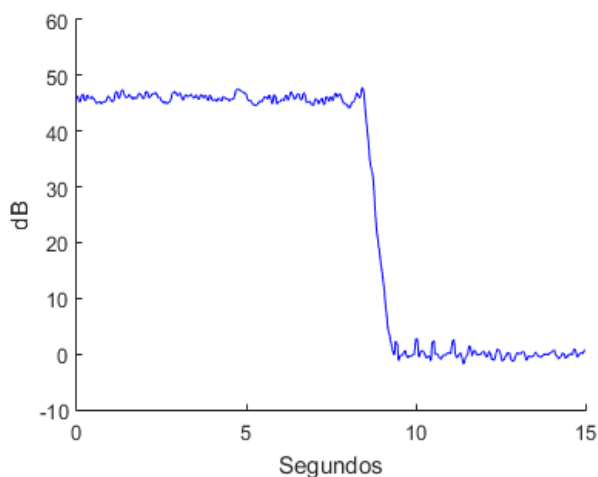


Figura 5.1. Curva de decrecimiento resultante del promedio, en la frecuencia de 2000Hz.

Aproximamos la curva de decrecimiento a una línea recta, \hat{L}_i , que es el nivel de la línea de regresión de la muestra i , fórmula (4-1).

$$\hat{L}_i(dB) = a + bt_i \quad (5-1)$$

Siendo a la intersección de la recta, b la estimación de la pendiente, ambas en decibelios y t es el tiempo de la muestra i , en segundos.

Las estimaciones de la intersección y de la pendiente vienen definidas en la norma como:

$$a(dB) = \bar{L} - b\bar{t} \quad (5-2)$$

$$b(dB) = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i L_i) - m \bar{t} \bar{L}}{\sum_{i=1}^n (t_i^2) - m \bar{t}^2} \quad (5-3)$$

Donde:

$$\bar{L}(dB) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (5-4)$$

$$\bar{t}(s) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (5-5)$$

Siendo L_i el promedio de los niveles de presión acústica de cada frecuencia y t_i el tiempo que dura cada una de las frecuencias.

La estimación del tiempo de reverberación en el rango de evaluación T20, viene dada por la fórmula siguiente:

$$\hat{T}(s) = -20/b \quad (5-6)$$

Una vez obtenemos el tiempo de reverberación en el rango de evaluación T20, lo multiplicamos por 3 para obtener el tiempo de reverberación T60.

Como el sonómetro utilizado no tenía integrado un módulo de tiempo de reverberación T60, hemos desarrollado un sistema para la medición de éste mediante el programa Matlab. La explicación del procedimiento se ha descrito en el apartado 7.2.2 y el código se muestra en el anexo C.

5.6 Expresión de los resultados

Los tiempos de reverberación para cada frecuencia se deben presentar en una tabla y en forma de curva. En este caso, se deben usar rectas que conecten los puntos o un diagrama de barras. La abscisa debe representar la frecuencia en una escala logarítmica, y la ordenada debe usar una escala de tiempo lineal con un origen en cero o bien una escala logarítmica. Las frecuencias nominales del centro de la banda para bandas de octava se deberían marcar en el eje de frecuencias de acuerdo con la norma IEC 61260. En la figura 5.2 podemos ver un ejemplo. Se debe indicar que rango de evaluación, T20 o T30, es usado para el cálculo del tiempo de reverberación.

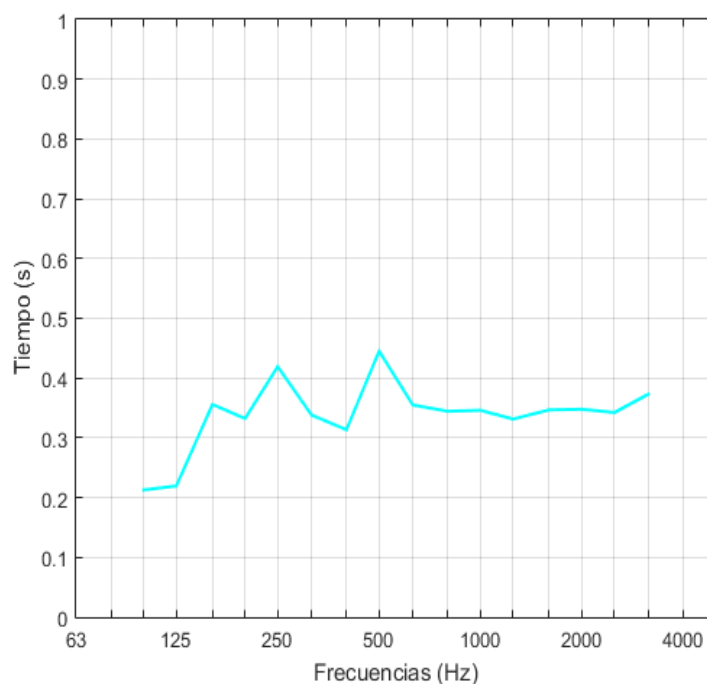


Figura 5.2. Curva representa tiempo de reverberación, T20.

5.7 Área de absorción equivalente

A partir del tiempo de reverberación podemos calcular el área de absorción acústica equivalente usando la fórmula de Sabine, (5-6).

$$A (m^2) = \frac{0,16V}{T} \quad (5-6)$$

El físico Wallace Clemente Sabine desarrolló esta fórmula que relacionaba el volumen de la sala, V , y la absorción total, A , con el tiempo que tarda el nivel de presión acústica en disminuir 60dB a partir del cese de la fuente sonora. Este área es necesario para calcular el índice de reducción acústica aparente, fórmula (3-7) y la diferencia de niveles normalizada, fórmula (3-9).

6 ANÁLISIS NORMA UNE-EN ISO 717-1:2013

EVALUACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO EN LOS EDIFICIOS Y DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN. PARTE 1: AISLAMIENTO RUIDO AÉREO

En 1968, se presentó el primer patrón internacional de medida del aislamiento ISO/R 717:1968, basado en una investigación alemana, la cual introdujo el soporte de las curvas de referencia de aislamiento junto con dos descriptores de medida, I_a e I_i . En 1982 se realizó una revisión de ésta y se añadieron nuevos descriptores para medidas *in situ* y en laboratorio, como la diferencia de niveles estandarizada y el índice de reducción acústica aparente para el aislamiento a ruido aéreo en edificios y elementos del interior de los edificios, el aislamiento a ruido de impacto y el aislamiento a ruido aéreo en fachadas y elementos de fachadas. Fue en 1996, cuando aparecen los términos de adaptación espectral C y C_{tr} , los cuales siguen en la última versión de la norma, UNE-EN ISO 717-1:2013 “Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento ruido aéreo”, la cual hemos seguido y analizaremos a continuación [14].

6.1 Objeto y campo de aplicación

En esta norma se definen las magnitudes globales para el aislamiento a ruido aéreo en edificios y de elementos de construcción como paredes, suelos, puertas y ventanas y proporciona reglas para la determinación de éstas a partir de los resultados de la medición en bandas de octava o de tercio de octavas. Además normaliza un método por el cual la dependencia frecuencial del aislamiento a ruido aéreo sólo dependa de un solo número, que caracteriza el comportamiento acústico.

Estas magnitudes simplifican la formulación de los requisitos acústicos en los edificios de la edificación y clasifican el aislamiento acústico [15].

6.2 Procedimiento de evaluación de magnitudes globales

Los valores³ que hemos obtenido de las mediciones se comparan con unos valores de referencia que vienen definidos en la norma (tabla 6.1) en las frecuencias de medición en el rango de 100Hz a 3150Hz para bandas de un tercio de octava y de 125Hz a 2000Hz para bandas de octava.

Tabla 6.1. Valores de referencia para aislamiento a ruido aéreo.

Frecuencia	Valores de referencia dB	
	Bandas de tercio de octava	Bandas de octava
100	33	36
125	36	
160	39	
200	42	45
250	45	
315	48	
400	51	52
500	52	
630	53	
800	54	55
1000	55	
1250	56	
1600	56	56
2000	56	
2500	56	
3150	56	

A partir de estos valores obtenemos las curvas de referencias, que podemos ver en las figuras 6.1 y 6.2 respectivamente, con las que comparemos los resultados de las mediciones.

³ Para valorar los resultados de una medición realizada en bandas de un tercio de octava o en bandas de octava, los datos se deben expresar con una cifra decimal, sino es así se debe redondear a un decimal de la misma forma que se redondea el ruido de fondo, como viene explicado en el apartado 3.7.

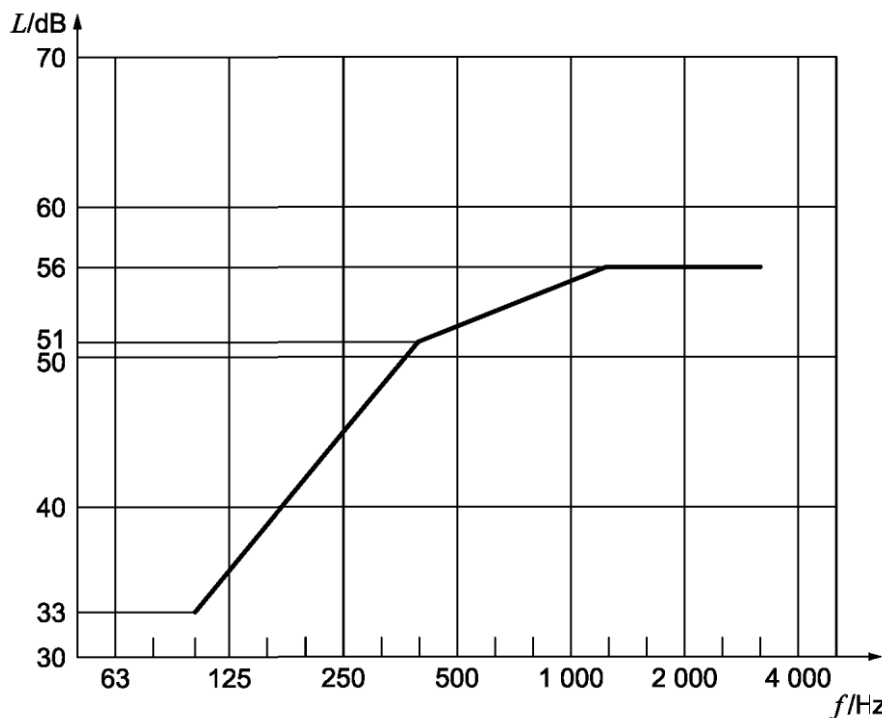


Figura 6.1. Valores de la curva de referencia para aislamiento a ruido aéreo, en bandas de tercio de octava [15].

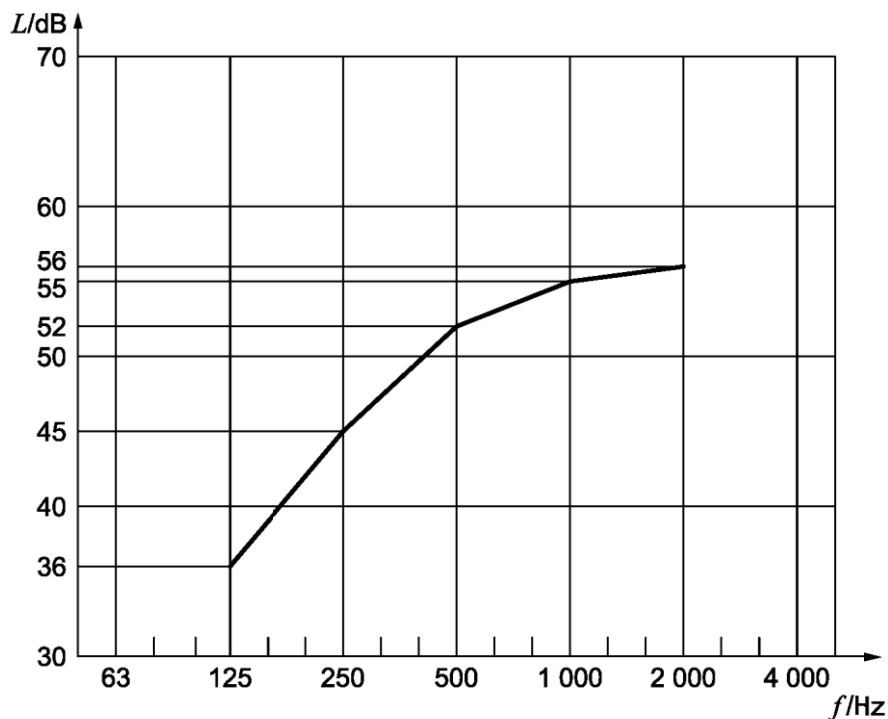


Figura 6.2. Valores de la curva de referencia para aislamiento a ruido aéreo, en bandas de octava [15].

Para la valoración del aislamiento a ruido aéreo debemos obtener la magnitud global⁴, la cual viene definida en la norma como el valor, en decibelios, correspondiente a 500Hz de la curva de referencia una vez ajustada. El ajuste de la curva de referencia se realiza desplazándola en saltos de 1dB hacia la curva de medida hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo mayor posible, pero no mayor a 32,0dB para la medición en las 16 bandas de un tercio de octava o a 10,0dB para las 5 bandas de octava. Se produce una desviación desfavorable en una determinada frecuencia, cuando el resultado de las mediciones es inferior al valor de referencia. Sólo debemos considerar las desviaciones desfavorables.

Las magnitudes globales dependen del espectro acústico de la fuente de ruido, por tanto, suelen venir acompañados por dos factores de corrección C y C_{tr} denominados términos de adaptación espectral. El primer término se aplica para ruido rosa incidente o ruido de tráfico ferroviario en aislamiento acústico entre recintos y el segundo para ruido de automóviles y de aeronaves en aislamiento de fachadas. Nosotros calcularemos ambos términos pero el que nos interesa más es el término de adaptación espectral C ya que estamos realizando un aislamiento acústico entre recintos.

Una vez que tenemos los valores correspondientes al valor ponderado, como por ejemplo R_w , y los dos términos de adaptación espectral, la magnitud global se expresa de la siguiente forma: $R_w(C; C_{tr})$. Las magnitudes de las exigencias de aislamiento a ruido aéreo vienen expresadas en dBA. Las ponderaciones vienen definidas en el anexo A.

6.2.1 Cálculo de los términos de adaptación espectral

Los términos de adaptación espectral, C_j deben calcularse con los espectros sonoros, definidos en la norma (tabla 6.2), a partir de la ecuación:

$$C_j = X_{Aj} - X_w \quad (6-1)$$

Siendo j el índice de los espectros sonoros nº 1 y 2, X_w el valor del índice global calculado a partir de los valores R , R' , D_n o D_{nT} y X_{Aj} se calcular mediante la fórmula (5-2).

$$X_{Aj}(dB) = -10 \log \sum 10^{\frac{(L_{ij}-X_i)}{10}} \quad (6-2)$$

Siendo i el índice para las bandas de un tercio de octava de 100Hz a 3150Hz o para bandas de octava

⁴ Las magnitudes globales se identifican con el subíndice w, indicando que el ese valor es ponderado, en inglés weighting.

de 125Hz a 2000Hz, L_{ij} los niveles sonoros a la frecuencia i para el espectro j , definidos en la tabla 5.2 y X_i el índice de reducción sonora R_i , o el índice de reducción sonora aparente R'_i , o la diferencia normalizada de nivel sonoro, $D_{n,i}$, o la diferencia estandarizada de nivel sonoro, $D_{nT,i}$, a la frecuencia de medición, i , expresado con una cifra decimal.

Tabla 6.2. Espectros de nivel sonoro para calcular los términos de adaptación.

Frecuencias	Niveles sonoros, L_{ij} dB			
	Espectro n°1 para calcular C		Espectro n°2 para calcular C_{tr}	
	Tercio de octava	Octava	Tercio de octava	Octava
100	-29		-20	
125	-26	-21	-20	-14
160	-23		-18	
200	-21		-16	
250	-19	-14	-15	-10
315	-12		-14	
400	-15		-13	
500	-13	-8	-12	-7
630	-12		-11	
800	-11		-9	
1000	-10	-5	-8	-4
1250	-9		-9	
1600	-9		-10	
2000	-9	-4	-11	-6
2500	-9		-13	
3150	-9		-15	

Nota: Todos los niveles están ponderados A y el nivel global de espectro normalizado a 0dB.

El término de adaptación del espectro resultante es un valor entero por definición y se debe identificar de acuerdo con el espectro usado como: C cuando se calcule con el espectro n°1 y C_{tr} cuando se calcule con el espectro n°2.

También pueden realizarse cálculos suplementarios de términos de adaptación espectral para los rangos de frecuencia ampliados, incluyendo las bandas de tercio de octava 50Hz + 63Hz + 80Hz y/o 4000Hz + 5000Hz las bandas de octava de 63Hz y/o 4000Hz. El rango de frecuencia tiene que expresarse en los

índices de C o C_{tr} , como por ejemplo: $C_{50-3150}$ o $C_{50-5000}$ o $C_{100-5000}$ y $C_{tr,50-3150}$ o $C_{tr,50-5000}$ o $C_{tr,100-5000}$.

La expresión de los resultados con estos términos de adaptación viene definido como:

$$R_w(C; C_{tr}; C_{50-3150}; C_{tr,50-3150}).$$

Los espectros sonoros en bandas de tercio de octava y en bandas de octava para los rangos de frecuencias ampliados se muestran en la tabla 6.3.

Tabla 6.3. Espectros de nivel sonoro para calcular los términos de adaptación para rangos de frecuencia ampliados.

Frecuencias	Niveles sonoros, L_{ij} dB							
Hz	Espectro nº1 para calcular				Espectro nº2 para calcular			
	$C_{50-3150}$		$C_{50-5000}$ y $C_{100-5000}$		$C_{tr,50-3150}$		$C_{tr,50-5000}$ y $C_{tr,100-5000}$	
	1/3octavas	Octavas	1/3octavas	Octavas	1/3octavas	Octavas	1/3octavas	Octavas
50	-40		-41		-25		-25	
63	-36	-31	-37	-32	-23	-18	-23	-18
80	-33		-34		-21		-21	
4000			-10	-5		-11	-16	-11
5000			-10				-18	

Nota: Todos los niveles están ponderados A y el nivel global de espectro normalizado a 0dB.
Las demás frecuencias se exponen en la tabla 5.2.

7 MEDICIONES “IN SITU” DE AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO

En este capítulo se ha desarrollado un caso práctico de los procedimientos para la realización de un certificado de aislamiento acústico a ruido aéreo en interiores, en un aula de los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Nos hemos guiado por el DB HR y las normas analizadas en los capítulos anteriores.

Se han mostrado los resultados obtenidos en las mediciones *in situ* del aislamiento acústico a ruido aéreo y algunas soluciones posibles si no se obtuviera el aislamiento acústico exigido.

7.1 Equipos de medición

Para realizar las mediciones necesitamos una instrumentación exigida por la norma UNE-EN ISO 163286-1:2014, ver capítulo 4. Ésta nos la ha proporcionado el Departamento de la Teoría de la Señal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros.

7.1.1 Generador de ruido y altavoz

Para generar el ruido rosa hemos usado un amplificador de potencia de la marca Brüel & Kjær, modelo 2734 como podemos ver en la figura 7.1. Éste se ha conectado a una fuente sonora omnidireccional, véase figura 7.2, también de la misma marca, modelo 4292 Light, la cual consta de un conjunto de 12 altavoces con configuración dodecaédrica que irradia de manera uniforme con una distribución esférica, que exige la norma UNE-EN ISO 3382, ver capítulo 5.



Figura 7.1. Generador de potencia Brüel & Kjær.



Figura 7.2. Fuente sonora omnidireccional Brüel & Kjær.

7.1.2 Sonómetro y micrófono

El sonómetro usado es de la marca Quest Technologies, modelo $3M^{TM}$ *SoundPro^{TM}* *DL - 1 1/3* de clase 1 y cumple los requisitos de las normativas: UNE-EN 61672-1:2003 “Electroacústica. Sonómetros. Parte 1: Especificaciones”, UNE-EN 61672-2:2003 “Electroacústica. Sonómetros. Parte 2: Ensayos de evaluación de modelo”, CEI 61260:1995 “Electroacústica. Filtros de banda de octava y de una fracción de banda de octava”, y las normas del Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI).

Se trata de un sonómetro integrador y promediador que realiza análisis por bandas de octava y 1/3 de octava. Éste dispone de una pantalla (128x64píxeles) en la que se muestran gráficamente los valores, los cuales se registran y se guardan en una tarjeta de memoria SD. Estos datos pueden ser descargados en un PC mediante el software Detection Management Software, el cual nos proporciona el fabricante.

Tiene un amplio rango de frecuencias entre 11,31Hz a 22,62kHz para ambos filtros. Y como es un sonómetro de clase 1 tiene una tolerancia de ± 0.6 dB.

Para las mediciones usaremos la ponderación frecuencia A (dBA) ya que es la que nos exige la norma.



Figura 7.3. Sonómetro Quest Technologies.



Figura 7.4. Micrófono Brüel & Kjær.

El micrófono es de la marca Brüel & Kjær, modelo 4936. Es un micrófono de condensador prepolarizado que tiene una respuesta frecuencia muy plana, alta estabilidad, baja distorsión y una elevada sensibilidad. Éste viene incorporado con el sonómetro y es también de clase 1.

7.1.3 Calibrador

La marca del calibrador es Quest Technologies, tratándose de un modelo Q-20 de clase 1. Es un calibrador de tipo altavoz cuya frecuencia de referencia es 1kHz y los niveles que puedes calibrar son 94dB y 114dB. Éste es el que recomienda el fabricante del sonómetro.



Figura 7.5. Calibrador Quest Technologies.

7.1.4 Portátil y mezclador

Para registrar las señales necesarias para el cálculo del tiempo de reverberación hemos utilizado un ordenador portátil HP 4520s, conectado a un mezclador analógico marca Yamaha modelo MG102c (figura 7.6) que así mismo se ha conectado al sonómetro que se ha usado como micrófono externo.



Figura 7.6. Portátil y mezclador.

7.2 Procedimiento empleado

Según la Guía de aplicación del DB HR del Código Técnico de la Edificación lo primero es identificar el uso o usos del edificio y proceder a la zonificación del mismo, el DB HR determina los valores de aislamiento acústico exigidos según el tipo de recinto, véase apartado 3.5.

7.2.1 Características del recinto y zonificación

La Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla dispone de laboratorios docentes que se utilizan para impartir la docencia de los estudios gestionados por el Centro y de las asignaturas de los Departamentos adscritos al mismo. Éstos están distribuidos por bloques, como podemos ver en la figura 7.8. Nosotros nos hemos centrado en un aula del bloque L3 que pertenece al Departamento de la Teoría de la Señal, que se encuentra en la primera planta, figura 7.9.

Estos laboratorios están destinados a actividades prácticas que no se pueden atender en las instalaciones de la escuela.



Figura 7.7. Talleres y laboratorios. Escuela Superior de Ingeniería.



Figura 7.8. Distribución de los talleres y laboratorios. Escuela Superior de Ingeniería.



Figura 7.9. Distribución de la primera planta de los talleres y laboratorios. Escuela Superior de Ingeniería.

Como podemos ver en la figura 7.10, el aula tiene forma rectangular y está dividido parcialmente por dos “paredes” en tres zonas. Como el área de la abertura es inferior a un tercio del área total de la sección vertical del recinto en el plano que contiene la pared divisoria, el recinto se considera como un único volumen, teniendo en cuenta esto, el volumen total del recinto es $224m^3$, la superficie total es de $56m^2$ y su altura de $3.5m$.

Dos de sus caras dan al exterior mientras que las otras dos son interiores, una hacia el pasillo y otra hacia una sala contigua. El aula tiene seis mesas, una pizarra, 30 sillas y varias cajas. Se ventila a través de dos ventanas grandes. El pasillo está dividido mediante puertas.

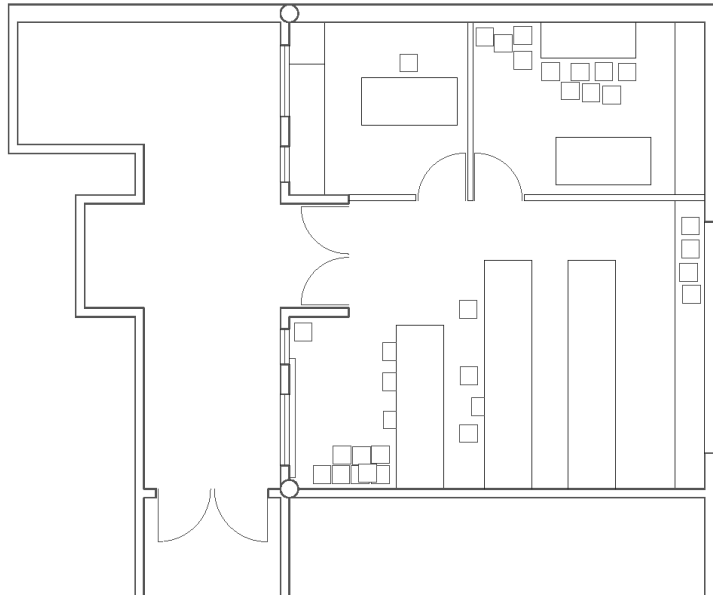


Figura 7.10. Plano del aula y del pasillo.

Según el DB HR las aulas de uso docente se definen como unidades de uso y recinto protegido, y el pasillo es zona común que se clasifica como recinto habitable, véase el apartado 3.5. En la figura 7.11 hemos marcado con una P los recintos protegidos y con una H los recintos habitables.

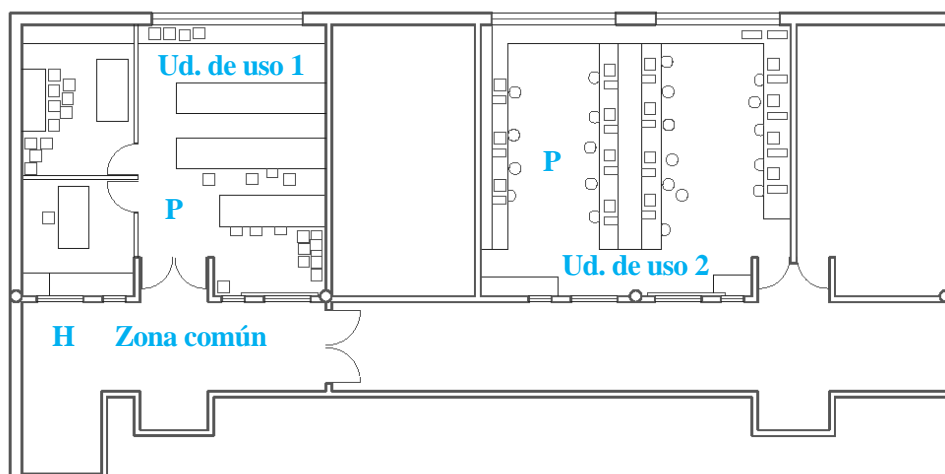


Figura 7.11. Zonificación de la primera planta del bloque L3.

Para la elección del recinto fuente y el recinto receptor nos hemos guiado por el DB-HR, el cual indica que se considerará recinto receptor a la unidad de uso, véase tabla 3.2, y por la Norma UNE-EN ISO 16283-1, que especifica que si los recintos tienen volúmenes diferentes, se debe escoger el recinto de mayor volumen como el recinto fuente, con dos excepciones. La primera excepción exige que para mediciones horizontales (entre recintos de una misma planta) se elija como recinto receptor el que tenga el volumen más simple aunque sea el mayor de los dos recintos; y la segunda que en mediciones verticales (recintos en distintas plantas) solo se puede usar el recinto superior como recinto fuente cuando el altavoz omnidireccional está colocado a una distancia suficiente del suelo para prevenir una excitación significativa del suelo por parte del sonido directo. Por tanto, nosotros elegimos el aula como recinto receptor ya que tiene una geometría más simple que el pasillo, y éste como recinto fuente.

Zonificado el edificio y sabiendo que el aula es una unidad de uso y recinto protegido, podemos determinar el nivel global exigido por la norma para que se garantice el aislamiento acústico del aula mirando la tabla 3.3.

Una vez caracterizado el recinto de medición podemos calcular los índices globales que caracterizan acústicamente el recinto. Hemos calculado el índice global de la diferencia de nivel estandariza, necesaria para comparar las exigencias del DB HR. Y además, el índice de reducción acústica aparente para determinar si la pared divisoria entre los dos recintos cumpliría con las exigencias que el Documento Básico Protección frente al ruido del CTE define para los elementos constructivos medidos en laboratorio.

El DB HR y la norma UNE EN ISO 717-1:2013 definen dos métodos distintos para el cálculo de éstos, nosotros los hemos calculado por ambos métodos. Uno y otro necesitan la diferencia de nivel estandariza total y el índice de reducción acústica total, por tanto lo primero que hicimos fue calcular el tiempo de reverberación de la sala receptora, el ruido de fondo y los niveles de presión acústica tanto de la sala receptora como de la emisora.

7.2.2 Tiempo de reverberación

Para el cálculo del tiempo de reverberación se ha usado el método de medición de ruido interrumpido que viene descrito en la Norma UNE-EN ISO 3382-2:2008, véase apartado 5.3, porque el sonómetro utilizado no tiene integrado un módulo de tiempo de reverberación T60.

Para obtener las curvas de decrecimiento del nivel de presión sonora del aula, excitamos la sala con un ruido rosa de 80dB de nivel de potencia acústica, para asegurarnos que hay una caída de 60dB como mínimo, mediante el generador de ruido y la fuente dodecaédrica. Registramos las señales con el micrófono del sonómetro conectado al mezclador y éste al portátil con el programa Matlab. Hemos necesitado un mezclador porque si registrábamos la señal conectando el sonómetro al portátil la señal saturaba. Con éste controlábamos el volumen de la señal de salida mediante la ganancia y así conseguimos que la señal no saturara.

Una vez obtenidas las señales, realizamos el promediado, véase apartado 5.5, que describe la norma. Para ello necesitamos la presión acústica al cuadrado del conjunto de los decrecimientos, por tanto hallamos de cada señal su presión acústica en cada banda pasándolas por un banco de filtros de un tercio de octava para obtener los niveles como si se registraran desde el sonómetro. Después las elevamos al cuadrado filtrándolas para obtener unas curvas suavizadas y facilitar así el proceso de alineamiento.

Obtenidas el conjunto de los decrecimiento de presión acústica, tuvimos que sincronizarlos para después los valores muestreados de la presión acústica discreta al cuadrado sumarlos para cada incremento del intervalo de tiempo de los decrecimientos y la secuencia de estas sumas usarla como un decrecimiento único del conjunto a partir del cual evaluamos T.

Por simplicidad, explicaremos el procedimiento de alineación a partir de dos curvas de decrecimiento. En la norma indica que los decrecimientos individuales se superponen sincronizando sus orígenes por tanto teníamos que encontrar un punto de referencia para alinearlas.

Al final decidimos que el mejor era el punto donde la curva decae 5dB. Encontrado ambos puntos, el que tenga menor distancia al origen será la curva que tomaremos de referencia para alinear todas las demás, figura 7.12. En este caso, sería la curva azul, por tanto debemos ajustar la curva cian. Para ello obtenemos la diferencia de muestras que hay entre ambos puntos y la desplazamos a la izquierda esa diferencia, obteniendo el resultado de la figura 7.13.

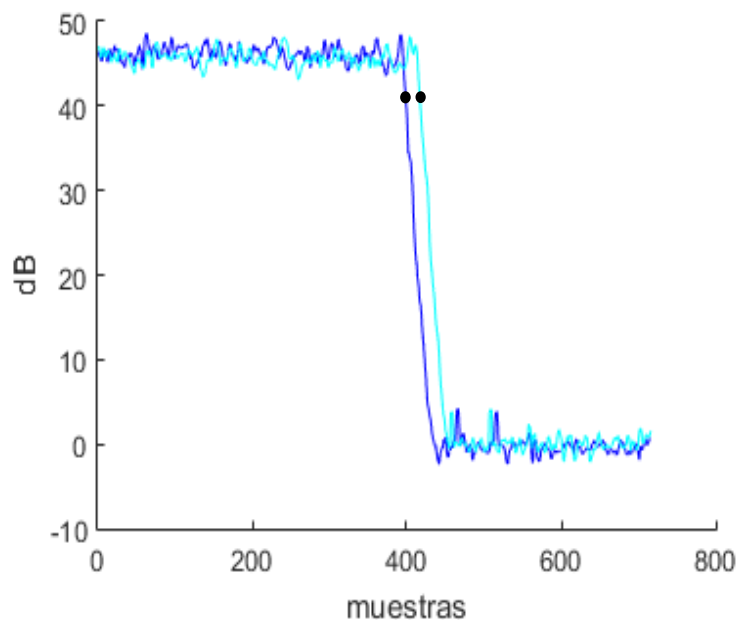


Figura 7.12. Dos curvas de decrecimiento que alinearemos.

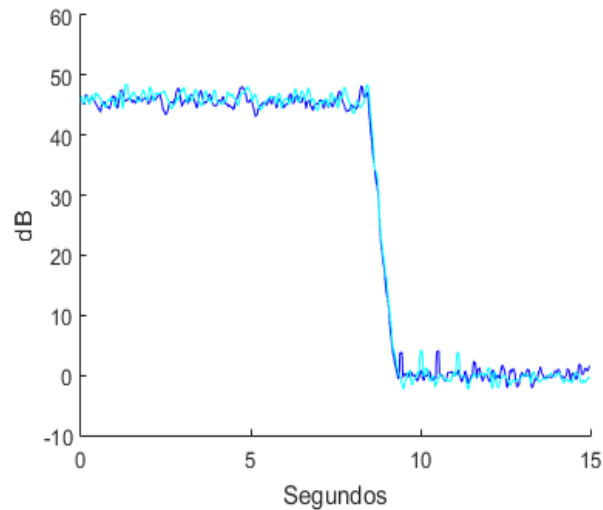


Figura 7.13. Resultado obtenido de la alineación de las curvas.

Alineadas las curvas, calculamos la media del conjunto sumando las presiones acústicas al cuadrado y dividiendo entre el número total de curvas que forman el conjunto, obteniendo como resultado la curva figura 7.14. Y por último, programamos el método de mínimos cuadrados que viene explicado en la norma, véase apartado 5.5, para calcular el tiempo de reverberación.

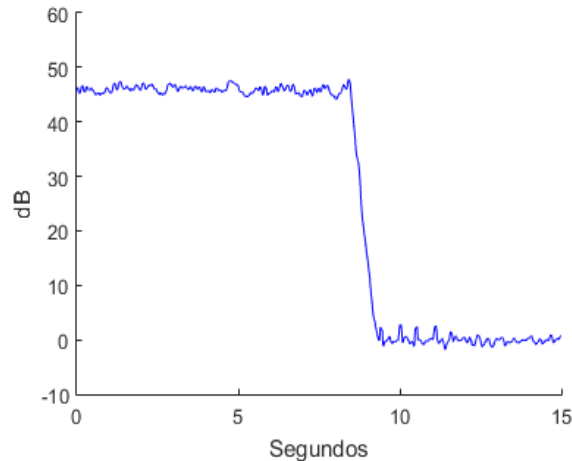


Figura 7.14. Media de las curvas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las mediciones pero primero hemos detallado el número de mediciones que se han realizado.

El método usado para decidir el número de posiciones de medición es el método de control, ver apartado 5.4. Por tanto, el número mínimo de combinaciones fuente-micrófono debe ser 2, el número de posiciones de la fuente mayor o igual a 1 y el de posiciones de micrófono mayor o igual a 2, véase tabla 5.1. Nosotros hemos medido para 2 posiciones de la fuente y 3 de micrófono, con dos mediciones en cada posición.

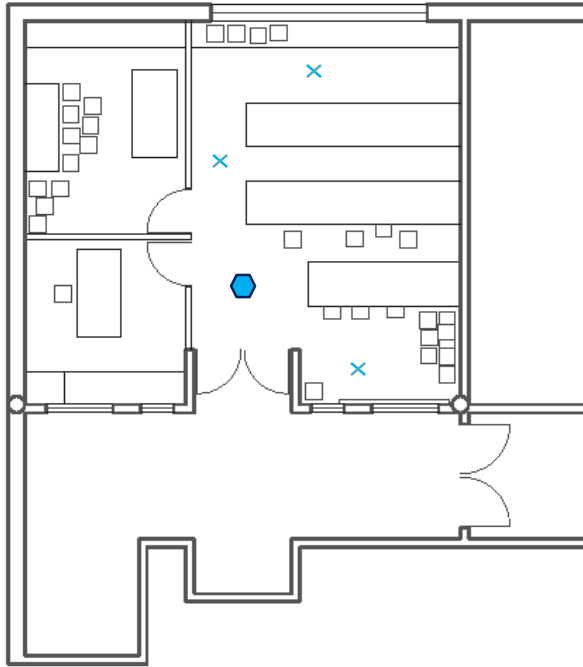


Figura 7.15. Posición de los sonómetros en la primera posición del altavoz.

- × Posición de micrófono fijo
- Posición del altavoz

Figura 7.17. Leyenda.

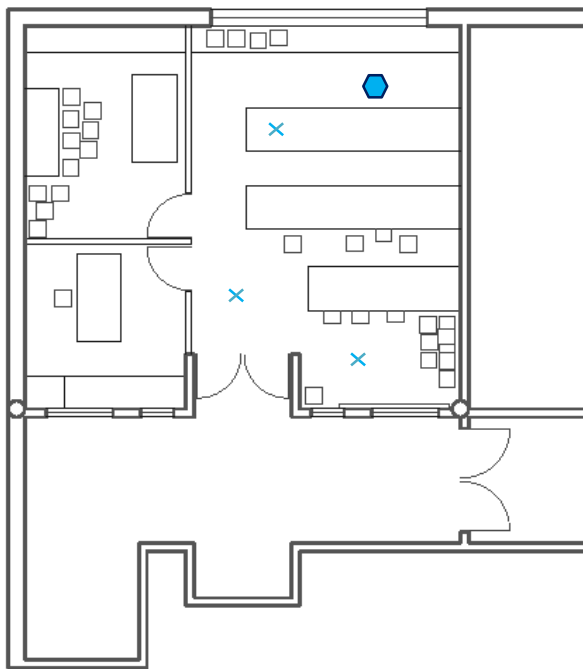


Figura 7.16. Posición de los sonómetros en la segunda posición del altavoz.

Los tiempos de reverberación calculados en la sala receptora con el sistema de medición que hemos desarrollado, véase anexo C, vienen recogidos en la siguiente tabla.

Tabla 7.1. Tiempo de reverberación sala receptora. Primer color hace referencia a las posiciones de los micrófonos de la primera posición del altavoz y el segundo al de la segunda posición del altavoz.

Tiempo de reverberación sala receptora (s)													
Frec. (Hz)	Pos. 1 Med. 1	Pos. 1 Med. 2	Pos. 2 Med. 1	Pos. 2 Med. 2	Pos. 3 Med. 1	Pos. 3 Med. 2	Pos. 1 Med. 1	Pos. 1 Med. 2	Pos. 2 Med. 1	Pos. 2 Med. 2	Pos. 3 Med. 1	Pos. 3 Med. 2	Promedio
100	0.57	0.7	0.91	1.1	0.67	0.6	0.79	0.75	1.16	0.87	0.98	1.29	1.08
125	1	0.63	1.12	0.92	0.5	0.77	0.92	0.7	1.19	0.64	0.67	0.85	1.2
160	1.04	0.67	1.15	0.70	0.77	1.1	0.78	0.7	0.73	0.78	0.94	0.93	0.96
200	1.32	1.1	1.51	0.71	0.92	0.73	0.89	1.01	0.71	0.83	0.67	0.63	0.97
250	1.4	0.64	0.84	1.4	0.94	1.17	0.9	1.29	0.96	1.32	1.4	1.19	1.2
315	1	0.88	1.19	1.23	0.70	0.77	1.01	1.4	0.97	0.9	1.26	0.86	1.15
400	0.82	0.84	1.12	0.86	1.11	1.04	0.9	0.97	1	0.85	1.03	1.4	0.98
500	0.87	1.5	0.93	0.83	1.12	1.33	0.89	0.97	1	0.82	1.5	1.09	0.97
630	0.96	1.3	1.4	0.69	1.3	1.03	0.87	0.9	0.8	0.94	0.79	0.85	0.83
800	0.95	0.88	1.01	0.92	1.04	1.06	1.29	0.89	0.88	0.83	0.92	0.84	1.07
1000	0.97	0.91	0.9	1.12	1.1	0.89	0.96	1.2	0.97	0.92	0.81	0.8	1.1
1250	0.87	1.24	0.98	0.81	0.87	1.06	1.01	1.01	0.89	0.83	0.68	0.75	0.95
1600	0.83	1.08	0.76	1.28	0.83	0.73	1.08	0.97	0.99	1.03	1	0.9	1.11
2000	1.09	0.95	0.79	0.81	0.9	0.81	1.28	0.96	1	0.97	1.01	0.87	1.02
2500	1.01	1.06	0.93	0.87	0.95	0.99	1.10	0.87	0.99	0.84	0.94	1.11	1.02
3150	1.06	0.35	0.87	1.12	1.06	1.04	0.85	0.89	0.87	0.83	0.96	1.11	1.03
4000	0.83	1.09	0.96	1.07	1	0.92	0.96	0.83	0.94	0.89	0.87	0.91	0.98
5000	0.94	0.98	0.85	0.79	0.89	0.87	0.95	0.92	0.89	0.91	0.81	0.80	0.92

Como podemos comprobar, el aula no cumple el límite del tiempo de reverberación exigido por el documento básico, tabla 3.6, ya que es mayor a 0,5s.

A continuación mostraremos las curvas alineadas de decrecimiento en las bandas de frecuencias de 500Hz y 2000Hz junto con su curva media de decrecimiento, figuras 7.15 y 7.16 respectivamente.

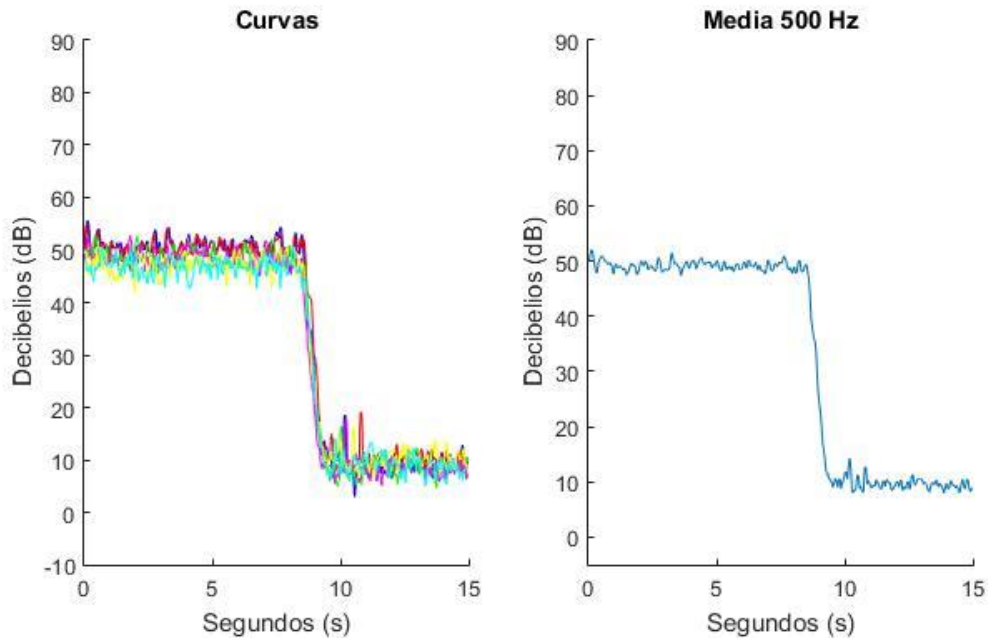


Figura 7.18. Curvas de decrecimiento alineadas a la izquierda y a la derecha la curva de decrecimiento media en la banda de frecuencia de 500Hz.

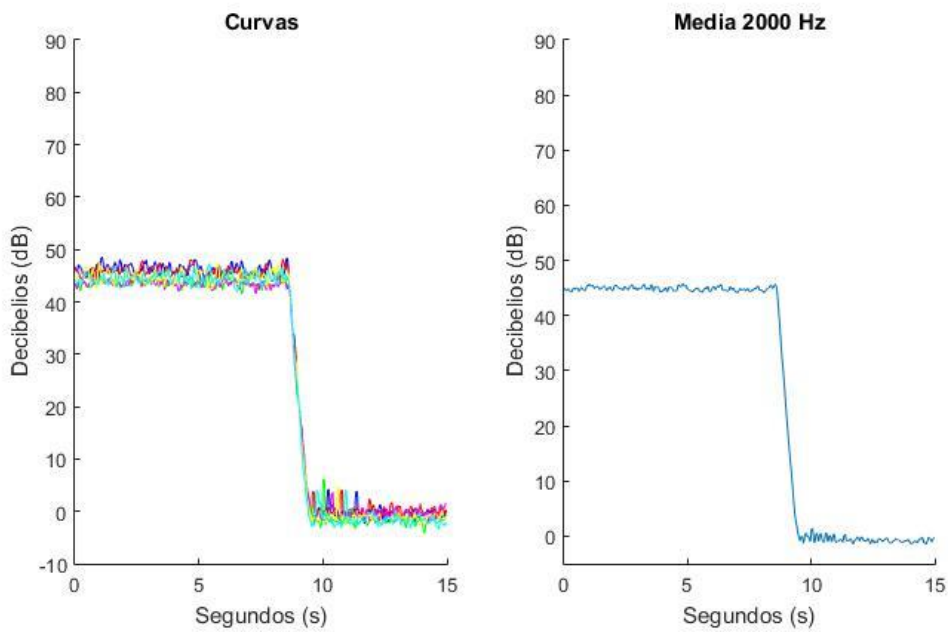


Figura 7.19. Curvas de decrecimiento alineadas a la izquierda y a la derecha la curva de decrecimiento media en la banda de frecuencia de 2000Hz.

7.2.3 Área de absorción equivalente

Una vez calculado el tiempo de reverberación calculamos el área de absorción equivalente, apartado 5.7, necesario para el cálculo de algunos índices de aislamiento acústico, como para la diferencia de nivel normalizada y el índice de reducción acústica aparente. Éste tiene un valor para cada banda de frecuencia porque depende del tiempo de reverberación de la sala en cada banda.

Las áreas de absorción equivalente que obtenemos, a partir de la fórmula de Sabina (5-6), se muestra en la tabla 7.2.

Tabla 7.2. Área de absorción equivalente (m^2)

Área de absorción equivalente (m^2)		
Frec. (Hz)	T (s)	A
100	1.08	30.79
125	1.2	20.67
160	0.96	34.49
200	0.97	34.28
250	1.2	27.78
315	1.15	28.84
400	0.98	33.93
500	0.97	34.09
630	0.83	40.22
800	1.07	31.02
1000	1.1	30.13
1250	0.95	34.8
1600	1.11	29.79
2000	1.02	32.62
2500	1.02	32.72
3150	1.03	32.45
4000	0.98	33.96
5000	0.92	36.17

7.2.4 Ruido de fondo

Antes de medir los niveles de presión de ambos recintos hay que medir el ruido de fondo en la sala receptora, para poder garantizar que el nivel de la señal en el recinto receptor no estará afectado por éste y si fuera así realizar una corrección de ruido de fondo, ver apartado 4.7. Para ello se han realizado cinco medidas, cada una en distintas posiciones en el aula con la fuente dodecaédrica apagada, respetando las distancias mínimas que exige la norma para las posiciones de micrófono entre ellos y entre los límites del recinto, véase figura 4.7.

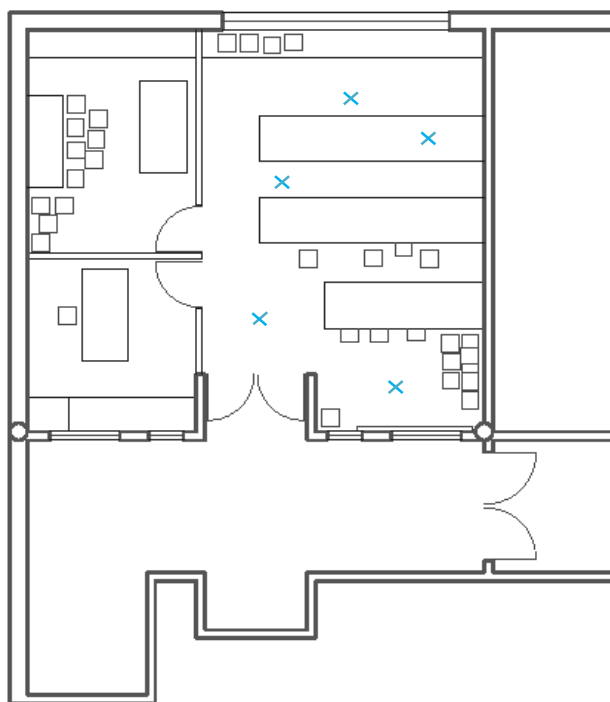


Figura 7.20. Posiciones medición del nivel de fondo.

Para medir los niveles de presión sonora usamos el sonómetro con ponderación temporal Fast y usando filtros de tercio de octava como nos exige la norma, véase capítulo 4, en el rango de frecuencias entre 100-3150Hz. El tiempo promedio que hemos decidido para cada medición es de 15s para cumplir con los requisitos del apartado 4.5.

Debemos asegurar que no haya diferencias de nivel mayores de 6dB entre bandas de tercio de octava adyacentes como exige la norma, apartado 4.7. Como podemos ver en la tabla 7.3, se cumple esa exigencia.

Tabla 7.3. Niveles de presión sonora del ruido de fondo en el recinto receptor, L_b (dB).

Niveles de presión sonora del ruido de fondo en el recinto receptor (dB)						
Frec. Hz	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Promedio
100	21.4	23.2	23	24.9	20.9	22.9
125	20.1	22.9	22.8	22.3	18.8	21.6
160	25.1	24.5	22.8	22.9	21.9	23.6
200	25.9	24.8	24.6	25.2	26.3	25.4
250	28.1	27.5	27.5	27.5	28.4	27.8
315	32.7	32.9	31.9	33.2	32.7	32.7
400	34	33.9	34.1	36.9	35	34.9
500	32.5	31.9	32.6	33	31.8	32.4
630	29.6	30.1	30.1	29.7	30.7	30.1
800	28.4	29.1	29.3	29.1	29.1	29
1000	29.8	30.1	30.2	30.2	30.4	30.1
1250	28.3	28.6	30.5	29.7	30.2	29.6
1600	26.7	27.4	28.2	27.5	28	27.6
2000	26	26.8	27.2	26.3	27.6	26.8
2500	23.9	24.4	25.2	26.7	26.6	25.5
3150	20.5	21.9	21	21.1	22.6	21.5
4000	16.8	17.5	17.7	18	18.6	17.7
5000	14.2	17	15.3	15.6	18.4	16.4

7.2.5 Nivel de presión acústica

Para las mediciones de los niveles de presión sonora hemos seguido el procedimiento descrito en el apartado 4.5. En el recinto receptor se han realizado 10 medidas en distintas posiciones para cada posición del altavoz y en el recinto emisor 5, para la elección de las posiciones véase la tabla 4.4.

Primero, medimos los niveles tanto en el recinto receptor como en emisor para la primera posición del altavoz y después lo mismo para la segunda, obteniendo el nivel de presión acústica promediado para cada frecuencia a partir de la fórmula (4-4).

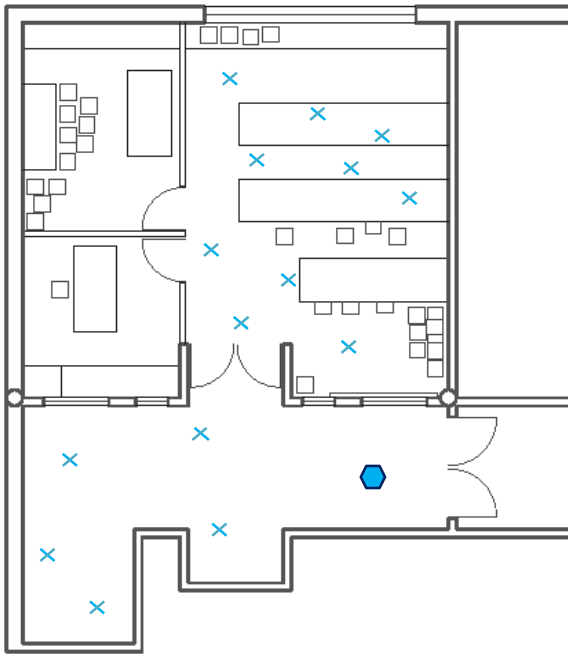


Figura 7.21. Posiciones de medición del nivel de presión sonora en la primera posición del altavoz en ambos recintos.

- × Posición de micrófono fijo
- Posición del altavoz

Figura 7.23. Leyenda.

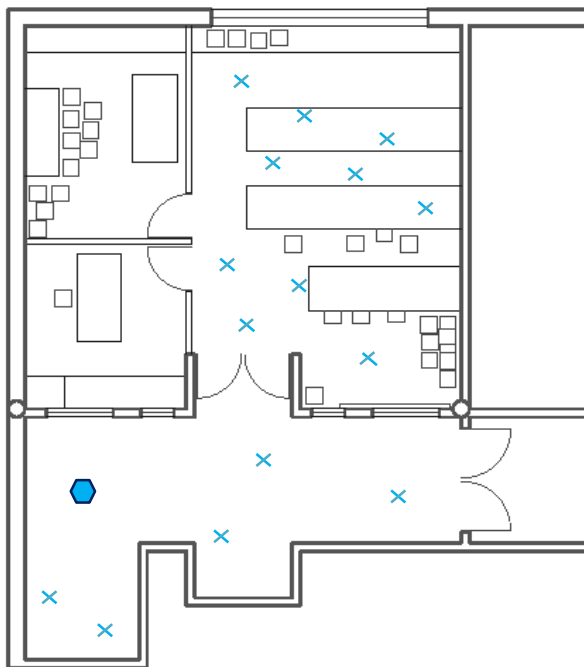


Figura 7.22. Posiciones de medición del nivel de presión sonora en la segunda posición del altavoz en ambos recintos.

Tabla 7.4. Niveles de presión sonora del recinto receptor en la primera posición del altavoz, L(dB).

Niveles de presión sonora del recinto receptor en la primera posición del altavoz (dB)											
Frec. Hz	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8	Pos. 9	Pos. 10	Promedio
100	36.7	41.3	43.3	40.6	38.5	38.6	37.2	31.5	39.2	36.4	39.3
125	49.2	44.8	47.7	50.3	45.7	41.7	50.1	40.5	50	45	47.6
160	43.8	47.2	48.7	46.8	46	43.1	47.5	44.8	45.1	46.2	46.2
200	55.9	54.3	52.6	52.4	54.6	51.3	48.3	56.4	51.1	56.3	54
250	50.2	54	52.2	53.1	52.7	51.5	52.7	51.3	51.1	52.9	52.3
315	53.4	51.8	51.9	52	51.4	52.9	50.6	52	53.5	51.6	52.2
400	52.2	51.1	52.1	51.5	51.4	52.2	51.7	51.7	51.6	50.9	51.7
500	49.6	52.1	53.2	52.5	52.8	50.3	51.8	52.4	51.1	50.3	51.8
630	48.2	50.7	51.9	50.6	51	49.5	48.9	49.3	48.9	50.4	50.1
800	47	50.5	50.6	50	49	49.1	48.5	48.7	48.8	48.3	49.17
1000	48.1	50.4	50	49.2	48.6	49.6	48.6	47.5	49	49.4	49.1
1250	49.5	51.3	51.8	51	50.6	50.5	49.8	50	50.2	50.2	50.5
1600	52.2	53.4	54.2	54	53.3	52.9	52	53.1	52.2	52.7	53.1
2000	51.4	52.6	53.5	52.5	52.3	51.4	51.3	51.6	51.5	51.3	52
2500	53.9	56.2	56.7	55.7	55.2	54.7	54.3	54.6	54.5	54.1	55.1
3150	53.7	55.6	56.5	54.9	54.5	54.5	53.8	54.4	54	54.1	54.7
4000	50.3	51.6	52	50.9	50.5	50.7	49.9	50.6	50.5	54.1	50.8
5000	49	50.7	51.4	50.7	49.9	49.7	49.2	49.9	49.1	50	50

Tabla 7.5. Niveles de presión sonora del recinto emisor en la primera posición del altavoz , L(dB).

Niveles de presión sonora del recinto emisor en la primera posición del altavoz (dB)						
Frec. Hz	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Promedio
100	47.8	40.1	43.1	47.7	48.4	46.4
125	64.2	65.7	64.2	54.3	51.6	62.7
160	66.7	65.3	65.5	58.4	58.6	64.2
200	69	40.1	70.9	66.1	65.1	68.6
250	70.8	65.7	72.8	66.9	67	71

315	72.7	65.3	70.7	70.2	68.6	71
400	73.6	74.9	72.7	70.7	69.1	72.7
500	74.1	73.2	72.3	71	70.4	72.4
630	74.2	74.3	73.2	71.3	70.9	73

Tabla 76. Niveles de presión sonora del recinto receptor en la segunda posición del altavoz, L(dB).

1000	74.7	74.9	73.6	71.7	71.4	73.1					
Niveles de presión sonora del recinto receptor en la segunda posición del altavoz (dB)											
Frec. Hz	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8	Pos. 9	Pos. 10	Promedio

2000	35.7	38.9	36.1	37.1	36.2	36.4	36.2	34.1	39	35.9	36.7
2500	38.4	38.9	40.7	41.2	39.6	39.6	42.1	40.8	43.6	43.1	41.1

Tabla 77. Niveles de presión sonora del recinto emisor en la segunda posición del altavoz, L(dB).

Niveles de presión sonora del recinto emisor en la segunda posición del altavoz (dB)											
Frec. Hz	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Promedio					
100	47.9	51.5	51.6	50.8	50.5	50.5					
125	51.1	50.2	52.8	50.9	51.6	50.8					
160	49.2	50.6	51.3	49.1	52.1	50.5					
200	48.2	50.5	51.2	49.5	49.4	49.5					
250	47	49.8	50.3	48.9	48	48.6					
315	47.2	48.5	49.3	48.7	47.9	48.1					
400	49.4	50.2	51.3	49.9	49.2	49.5					
500	51.2	52.6	53.7	53.1	51.8	52.2					
630	48.6	51	52.1	51.8	50.2	50.5					
800	52.9	54.6	55.2	54.2	53.8	53.7					
1000	52.6	53.7	55.2	54	53.9	53.5					
1250	48.8	49.7	51.3	50.20	49.8	49.7					
1600	47.4	48.5	50.3	49.4	49.2	48.8					
2000	74.3	74.3	74.3	75.6	75.4	74.8					
2500	75.4	75.6	76	76.1	77.4	76.2					
3150	74.6	74.5	74.7	75.1	75.9	75					
4000	72.1	72.6	72.6	73.2	73.7	72.9					
5000	73.1	73.1	73.2	74.4	74.7	73.8					

Una vez hallados los niveles de presión acústica, debemos garantizar que no se vean afectados por el ruido de fondo los niveles del recinto receptor, comprobando que el nivel de ruido de fondo debe ser al

menos 6dB por debajo del nivel de señal junto con el ruido de fondo en cada banda de frecuencia. Si la diferencia de niveles es inferior a 10dB pero superior a 6dB, se calcula las correcciones del nivel de presión acústica promediado usando la fórmula (4-5), si es menor o igual a 6dB en cualquiera de las bandas de frecuencia, se usa la corrección 1,3dB, véase apartado 4.7. En nuestro caso, en ninguna de las mediciones hay que realizarla ya que no se cumple ninguno de los casos anteriores.

7.2.6 Índices de aislamiento acústico

Obtenidos los niveles de presión acústica en ambos recintos, hemos calculado tanto el índice de aislamiento acústico a ruido aéreo, D_{nT} , como el índice de reducción acústica aparente, R' , que caracteriza acústicamente al elemento de separación entre ambos recintos. Estos índices se han calculado a partir de las fórmulas recogidas en el apartado 3.4, del capítulo 3.

Primero se ha calculado el índice de aislamiento acústico a ruido aéreo, D_{nT} , a partir de la ecuación (3-10), para las mediciones de la primera posición de altavoz, después para las mediciones de la segunda posición, y por último el índice total con la fórmula (4-1) definida en el apartado 4.5.

Tabla 7.8. Índice de aislamiento acústico a ruido aéreo, D_{nT1} en la primera posición del altavoz.

Índice de aislamiento acústico a ruido aéreo, D_{nT1} (dB)				
Frec. (Hz)	L1*	L2**	D	D_{nT1}
100	46.4	39.3	7.1	10.5
125	62.7	47.6	15.1	22.
160	64.2	46.2	17.9	20.8
200	68.6	54	14.6	17.5
250	71	52.3	18.5	22.3
315	71	52.2	18.8	22.5
400	72.7	51.7	21	23.9
500	72.4	51.8	20.7	23.6
630	73	50.1	22.9	25.1
800	73.4	49.17	24.2	27.5
1000	73.1	49.1	24	27.5
1250	73.8	50.5	23.2	26.1
1600	76.3	53.1	23.3	26.8
2000	74.6	52	22.6	25.7
2500	75.5	55.1	20.5	23.6

3150	74.4	54.7	19.7	22.9
4000	72.7	50.8	21.9	24.8
5000	73	50	23	25.7

Tabla 7.9. Índice de aislamiento acústico a ruido aéreo, D_{nT2} en la segunda posición del altavoz.

*L1: Niveles de presión sonora del recinto emisor, posición altavoz 1.
 **L2: Niveles de presión sonora del recinto receptor corregidas del ruido de fondo, posición altavoz 1.

Índice de aislamiento acústico a ruido aéreo, D_{nT2} (dB)				
Frec. Hz	L1*	L2**	D	D_{nT2}
100	60	36.7	23.2	26.5
125	63.2	41.1	22.1	29
160	68.3	44.6	23.7	26.6
200	71	50.2	20.6	23.5
250	72.5	52.3	20.3	24.1
315	72	50.5	21.5	25.1
400	74.1	50.8	23.3	26.3
500	74	50.5	23.5	26.4
630	73.4	49.5	23.9	26.1
800	73.4	48.6	24.7	28.1
1000	74.2	48.1	26.1	29.5
1250	74.3	49.5	24.8	27.6
1600	77.3	52.2	25	28.5
2000	74.8	50.5	24.3	27.4
2500	76.2	53.7	22.5	25.5
3150	75	53.5	21.5	24.6
4000	72.9	49.7	23.2	26.2
5000	73.8	48.8	24.9	27.6

*L1: Niveles de presión sonora del recinto emisor, posición altavoz 2.
 **L2: Niveles de presión sonora del recinto receptor corregidas del ruido de fondo, posición altavoz 2.

Tabla 7.10. Índice de aislamiento acústico totales a ruido aéreo, $D_{nTTotal}$ (dB).

Índice de aislamiento acústico totales a ruido aéreo, $D_{nTTotal}$ (dB)			
Frec. Hz	D_{nT1}	D_{nT2}	$D_{nTTotal}$

100	10.5	26.5	13.4
125	22.	29	24.2
160	20.8	26.6	22.8
200	17.5	23.5	19.5
250	22.3	24.1	23.1
315	22.5	25.1	23.6
400	23.9	26.3	24.9
500	23.6	26.4	24.8
630	25.1	26.1	25.6
800	27.5	28.1	27.8
1000	27.5	29.5	28.4
1250	26.1	27.6	26.8
1600	26.8	28.5	27.6

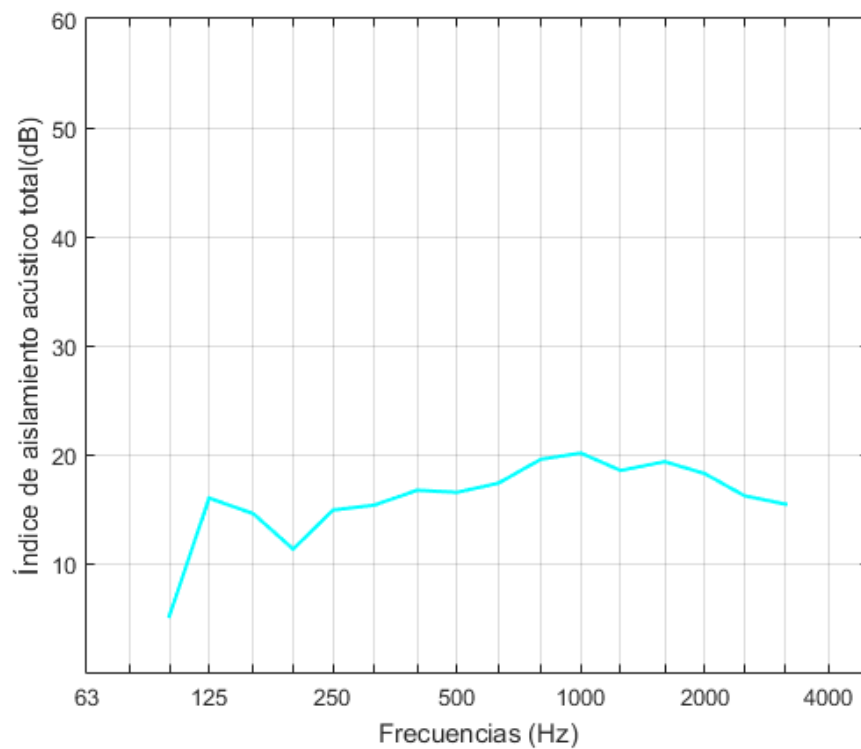


Figura 7.24. Espectros de los índices de aislamiento acústico totales a ruido.

A continuación, hemos calculamos el índice de reducción acústica aparente total que caracteriza acústicamente la pared que separa ambos recintos mediante la fórmula (4-2). Primero, los índices para cada posición del altavoz y después, el total.

Para este índice es necesario conocer la superficie del elemento constructivo que queremos caracterizar, en nuestro caso es la pared divisoria entre ambos recintos, S .

$$S(m^2) = \text{Altura}_{\text{pared}} \cdot \text{Ancho}_{\text{pared}} = 3,7 \cdot 8 = 29,6 \quad (7-1)$$

Tabla 7.11. Índice de reducción acústica aparente, R'_1 , en la primera posición del altavoz.

Índice de reducción acústica aparente, R'_1				
Frec. (Hz)	L1*	L2**	D	R'_1
100	46.4	39.3	7.1	7
125	62.7	47.6	15.1	18.5
160	64.2	46.2	17.9	17.3
200	68.6	54	14.6	14
250	71	52.3	18.5	18.8
315	71	52.2	18.8	18.9
400	72.7	51.7	21	20.4
500	72.4	51.8	20.7	20
630	73	50.1	22.9	21.6
800	73.4	49.17	24.2	24
1000	73.1	49.1	24	23.9
1250	73.8	50.5	23.2	22.5
1600	76.3	53.1	23.3	23.4
2000	74.6	52	22.6	22.7
2500	75.5	55.1	20.5	20
3150	74.4	54.7	19.7	19.3
4000	72.7	50.8	21.9	21.3
5000	73	50	23	22.2

*L1: Niveles de presión sonora del recinto emisor, posición altavoz 1.
 **L2: Niveles de presión sonora del recinto receptor corregidas del ruido de fondo, posición altavoz 1.

Tabla 7.12. Índice de reducción acústica aparente, R'_2 , en la segunda posición del altavoz.

Índice de reducción acústica aparente, R'_2

Frec. (Hz)	L1*	L2**	D	R' ₂
100	60	36.7	23.2	23
125	63.2	41.1	22.1	25.5
160	68.3	44.6	23.7	23.1
200	71	50.2	20.6	20
250	72.5	52.3	20.3	20.6
315	72	50.5	21.5	21.6
400	74.1	50.8	23.3	22.7
500	74	50.5	23.5	22.9
630	73.4	49.5	23.9	22.6
800	73.4	48.6	24.7	24.5
1000	74.2	48.1	26.1	26
1250	74.3	49.5	24.8	24.1
1600	77.3	52.2	25	25
2000	74.8	50.5	24.3	23.9
2500	76.2	53.7	22.5	22
3150	75	53.5	21.5	21.1
4000	72.9	49.7	23.2	22.6
5000	73.8	48.8	24.9	24.1

*L1: Niveles de presión sonora del recinto emisor, posición altavoz 2.
 **L2: Niveles de presión sonora del recinto receptor corregidas del ruido de fondo, posición altavoz 2.

Tabla 7.13. Índice de reducción acústica aparente total, R'_{Total} .

Índice de reducción acústica aparente total, R'_{Total}			
Frec. Hz	R' ₁	R' ₂	R' _{Total}
100	7	23	10
125	18.5	25.5	20.7
160	17.3	23.1	19.3
200	14	20	16
250	18.8	20.6	19.6
315	18.9	21.6	20.1
400	20.4	22.7	21.4

500	20	22.9	21.2
630	21.6	22.6	22.1
800	24	24.5	24.3
1000	23.9	26	24.8
1250	22.5	24.1	24.2
1600	23.4	25	24

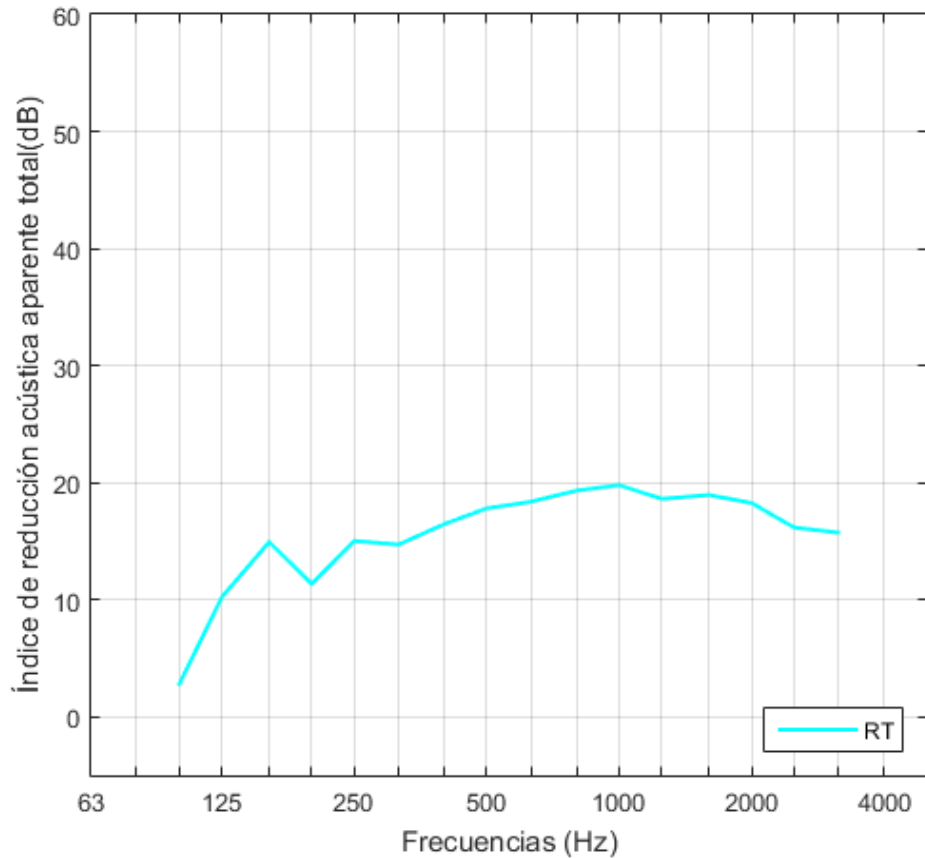


Figura 7.25. Espectro de índice de reducción acústica aparente total.

7.2.7 Índices globales

Hemos hallado los índices globales mediante el método descrito tanto por el DB HR como por la norma UNE-EN ISO 717-1. La norma ISO calcula un índice general al cual después se le puede aplicar un término de adaptación espectral que lo particulariza dependiendo del ruido incidente, denotado como $D_{nT,w}$ o R'_w , el primero corresponde al índice global de la diferencia de nivel estandarizada y el segundo al del índice de reducción acústica aparente. Y el Documento Básico Protección frente al ruido, calcula un índice general ponderado en A, es decir, particularizando para un ruido rosa, el cual se expresa de la siguiente manera: $D_{nT,A}$ o R'_A , dependiendo del índice global que calculemos.

El resultado de ambos debe ser parecido porque la única diferencia en el cálculo es la normalización del ruido rosa ya que el DB HR del CTE lo normaliza para el rango de frecuencias de 100-5000Hz con ponderación A y la norma ISO de 100-3150Hz sin ponderación.

Primero calculamos el índice global de la diferencia de nivel estandarizada por ambos métodos y posteriormente el del índice de reducción acústica aparente.

7.2.7.1 Diferencia de nivel estandarizada

Según el DB HR, el índice general ponderado A se calcula a partir de la fórmula (3-11), definida en el apartado 3.4.4. El resultado que hemos obtenido es: $D_{nT,A} = 26,39$ dBA.

A continuación se ha hallado la magnitud global según la norma UNE-EN ISO 717-1. Para hallarla hemos utilizado el método de comparación, véase apartado 6.2. Los valores obtenidos se comparan con la curva de referencia definida en la norma a partir de los valores de la tabla 7.1. Como nosotros estamos trabajando con filtros de un tercio de octava usamos la curva de referencia para aislamiento a ruido aéreo, en bandas de tercio de octava, figura 6.1.

El método de comparación consiste en desplazar la curva de referencia en saltos de 1dB hacia la curva del índice de aislamiento acústica medida, hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo mayor posible, pero no mayor a 32,0dB. Se produce una desviación desfavorable en una determinada frecuencia, cuando el resultado de las mediciones es inferior al valor de referencia. Y la magnitud global es el valor en decibelios de la curva de referencia ajustada en la banda de 500Hz.

Las magnitudes globales suelen ir acompañados por dos términos de adaptación espectral, C y C_{tr} . Su cálculo viene descrito en el apartado 6.2.1. El índice obtenido es el siguiente:
 $D_{nT,w}(C, C_{tr}) = 26 (0; -1)$ dB

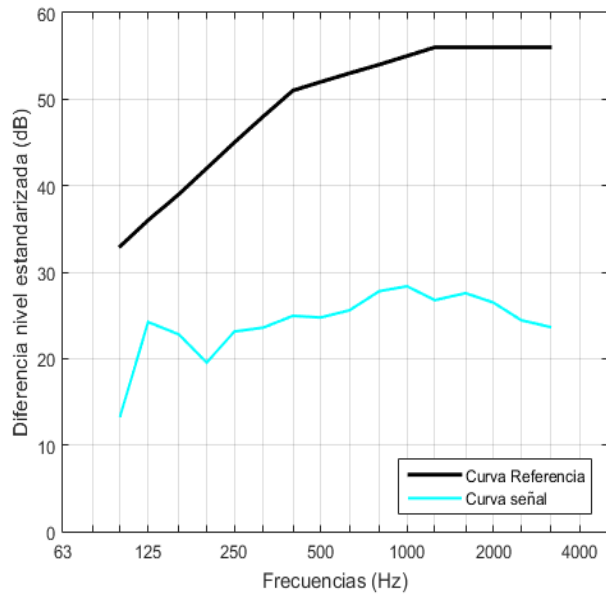


Figura 7.26. Curva de referencia y la curva de la diferencia de nivel estandarizada.

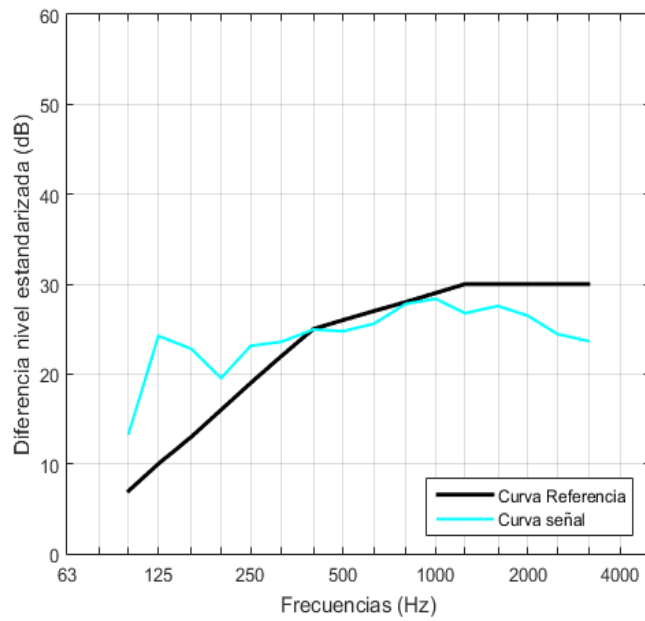


Figura 7.27. Curva de referencia ajustada y la curva de la diferencia de nivel estandarizada.

Tabla 7.14. Resumen de los resultados de la diferencia de nivel estandarizada.

Índice global de la diferencia de nivel estandarizada, ponderada A	Índice global de la diferencia estandarizada
$D_{nT,A} = 26,39 \text{ dBA}$	$D_{nT,w}(C, C_{tr}) = 26 (0 ; -1) \text{ dB}$

7.2.7.1 Índice de reducción acústica aparente

El índice global del índice de reducción acústica aparente se calcula a partir de la fórmula (3-18), definida en el apartado 3.4.8, según el Documento Básico Protección frente al ruido del CTE. El resultado es: $R'_A = 22,87$ dBA.

Para el cálculo de R'_w hemos seguido el mismo procedimiento que para $D_{nT,w}$, pero usando el índice de reducción acústica aparente calculado en el apartado anterior. El resultado esta recogido en la tabla 7.17. Y en las figuras 7.26 podemos ver la curva de referencia junto con la curva de reducción acústica aparente y en la 7.27 la curva de referencia ya ajustada.

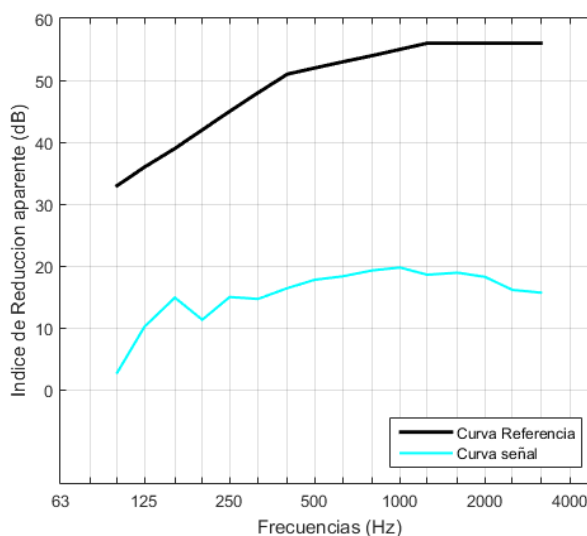


Figura 7.28. Curva de referencia y la curva del índice de reducción acústica aparente.

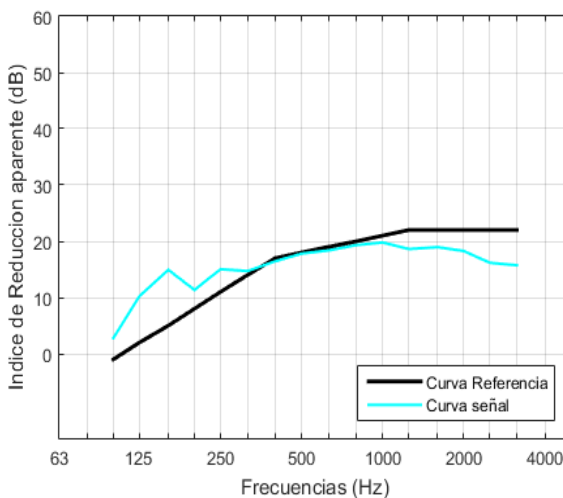


Figura 7.29. Curva de referencia ajustada y la curva del índice de reducción acústica aparente.

Tabla 7.15. Resumen de los resultados del índice de reducción acústica aparente.

Índice global del índice de reducción acústica aparente, ponderada A (dBA)	Índice global del índice de reducción acústica aparente (dB)
$R'_A = 22,87$ dBA	$R'_w(C, C_{tr}) = 23$ (-1 ; -2) dB

Según el DB HR, aunque las exigencias de aislamiento se establecen en términos de ponderación A pueden aceptarse las aproximaciones siguientes, siempre que las diferencias sean menores que 1dB:

$$D_{nT,A} = D_{nT,w} + C \quad (7-1)$$

$$R_A = R'_w + C \quad (7-2)$$

Se suma el término de adaptación espectral C porque estamos calculando el aislamiento acústico entre recintos. En nuestro caso, $D_{nT,A} = 26 + 0$ dBA, por tanto sería igual que el índice global $D_{nT,w}$ y $R_A = 23 - 1 = 22$ dBA. Podemos comprobar que ambos procedimientos nos llevan a resultados similares.

Si comparamos los índices globales que hemos calculado con las exigencias definidas en el DB HR del CTE, tabla 3.2, ni el recinto ni la pared cumplen los requisitos mínimos de aislamiento acústico a ruido aéreo.

El índice global de reducción acústica en laboratorio, R_A , que debe cumplir la pared con una puerta en común que separa el aula (recinto protegido) del pasillo (recinto habitable) debe ser mayor a 30dBA, véase tabla 3.3 y el valor $D_{nT,A}$ mayor a 50dBA, mirar tabla 3.2.

Era de esperar que no se cumplieran los requisitos mínimos ya que los edificios de estos laboratorios se construyeron para la Exposición Universal de Sevilla de 1992 (Expo'92) y además, éstos no estaban previstos para uso docente, aunque años más tarde lo reformaron, todavía no estaban vigentes las exigencias actuales.

A continuación, comentaremos algunas soluciones acústicas que permiten amortiguar el sonido e insonorizar los recintos para mejorar el aislamiento acústico.

7.3 Soluciones acústicas

La aplicación de soluciones acústicas es más complicada en el caso de aislamiento en edificios construidos que en edificios de nueva construcción porque estos últimos son diseñados con anterioridad para que cumplan con las exigencias del Código Técnico de la Edificación y a los edificios construidos hay que realizarles un tratamiento acústico adicional para intentar cumplir con éstas.

Para solucionar los problemas acústicos existen dos tipos de tratamiento, el aislamiento acústico y el acondicionamiento acústico. El primero reduce o evita la transmisión de las ondas sonoras y las vibraciones, por vía aérea o vía estructural, entre recintos. Y el segundo sirve para controlar y mejorar las condiciones de propagación de las ondas sonoras en el interior de un recinto, y así obtener un ambiente acústico apropiado a la actividad que se desarrolla en él.

Se utilizan materiales aislantes para el aislamiento acústico ya que reducen la transmisión de las ondas sonoras, y materiales absorbentes para el acondicionamiento acústico ya que transforman gran parte de la energía sonora que los atraviesa, evitando su reflexión. Los primeros son materiales pesados (alta/media densidad) y tienen mayor rigidez, como el hormigón y bloques cerámicos, algunos metales, o placas de yeso laminado y maderas. Y los segundos son de baja densidad (ligeros) y de gran flexibilidad, como las fibras minerales (vidrio, lana de roca), espumas acústicas (poliuretano, melamina) y textiles (algodón, poliéster, etc.).

En nuestro caso, habría que realizar ambos tratamientos ya que no cumple ni el aislamiento acústico, por tanto deberíamos usar algún material que aislé la sala, ni el tiempo de reverberación el cual tendríamos que reducir añadiendo absorción al recinto.

Para mejorar el aislamiento como es más complicado y costoso modificar las paredes, deberíamos centrarnos en evitar las aberturas y otras vías de transmisión para el sonido que anulen el aislamiento existente. Por tanto, habría que controlar el cierre de las puertas, evitando que queden rendijas con las puertas cerradas, ajustándola bien con el suelo y con el marco, y el de las ventanas asegurando que no quede ninguna abertura al cerrarlas. Y según las obras que se quieran realizar, se podría sustituir las puertas y las cristalerías, incluso introducir capas aislantes en la pared.

Y para disminuir el tiempo de reverberación, una de las soluciones sería instalar un falso techo mediante paneles que se montan sobre unas guías suspendidas en el techo, cuya cavidad se rellena con material absorbente; o baffles. Otra solución sería recubrir la pared con un material absorbente, pero ésta no sería práctica porque los materiales absorbentes se ensucian con gran facilidad. Por tanto, normalmente se concentra casi toda la absorción necesaria en el techo para reducir el tiempo de reverberación deseado.

8 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

8.1 Conclusiones

En este proyecto hemos realizado un estudio del aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos interiores, mediante mediciones *in situ* de un aula de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

Se han analizado las normas ISO vigentes necesarias para elaborar un certificado de aislamiento acústico y calculado los índices que caracterizan el aislamiento a ruido aéreo tanto de los recintos interiores como de los elementos constructivos que los separan.

Además, se ha desarrollado un sistema para la medición del tiempo de reverberación de una sala basado en la norma UNE-EN ISO 3382-2:2008. Y resuelto el problema de alineación de las curvas de decrecimiento para realizar los promediados con resultados satisfactorios.

En referencia al aislamiento acústico del aula, a partir de los resultados de las mediciones *in situ* de aislamiento a ruido aéreo entre recintos, hemos comprobado que ni el aula ni la pared de separación entre esta y el pasillo, cumplen con los requisitos mínimos del Código Técnico de la Edificación del DB HR. Dicho resultado entra dentro de lo esperado, porque los edificios de la Escuela se construyeron para la Exposición Universal de Sevilla de 1992 (Expo'92) y en esos años todavía no estaban vigentes las exigencias actuales.

También se ha comprobado que el tiempo de reverberación no cumple con las exigencias que el DB-HR establece para aulas de menos de 350 m^3 . A pesar de ser un laboratorio su uso actual es el de laboratorio docente, por lo que una reducción del tiempo de reverberación permitiría una mayor calidad acústica de la sala de cara a la comunicación, por tanto se debería acondicionar para que cumpliera con los requisitos.

Como conclusión final, el cumplimiento de los requisitos de aislamiento acústico debe estudiarse durante el proceso de diseño y construcción ya que después para conseguir un buen aislamiento acústico se requiere un sobre coste adicional. Y es importante el aislamiento acústico y la necesidad de las certificaciones para garantizar unos niveles de ruido aceptables y evitar los efectos nocivos de éstos sobre nuestra salud y calidad de vida.

8.2 Líneas futuras

Como aspectos a desarrollar en un futuro podríamos señalar:

- Estudio del tratamiento acústico a realizar para optimizar los índices de aislamiento, estudiando los materiales que se usarían y el presupuesto que tendría mejorar el aislamiento acústico de la sala.
- Medición del aislamiento a ruido en fachadas, cubiertas y en suelos en contacto con el exterior. Realizando los cálculos de los índices de aislamiento a ruidos exteriores y estudiando las distintas fuentes de ruido externas.
- Estudio de acondicionamiento acústico de la sala, dependiendo de la funcionalidad de uso al que está destinado, seleccionando los materiales que se usarían teniendo en cuenta el coste de cada uno. Éstos definirían el tiempo de reverberación de la sala y la buena elección de estos decidirían el éxito o fracaso del diseño acústico del recinto.

REFERENCIAS

- [1] BOE número 276. «Ley 37/2003, de 17 de Noviembre, del Ruido» (Noviembre de 2003).
- [2] CTE. «Código técnico de la edificación. Guía de aplicación del DB HR. Protección frente al ruido». Versión V.02 (Septiembre 2014)
- [3] AENOR, «Norma UNE-EN ISO 16260:1997. Electroacústica. Filtros de bandas de octava y de bandas de una fracción de octava. » (Octubre 1997).
- [4] Michael Möser, José Luis Barros. «Ingeniería Acústica: Teoría y Aplicaciones». 2ª Edición, Springer. (2009)
- [5] «Visor cartográfico de la contaminación acústica de Europa» (8 de Julio de 2015). *TYS magazine*. <http://www.tysmagazine.com/>
- [6] Manuel Recuero López. «Ingeniería acústica». Editorial Paraninfo. (2000)
- [7] «Ingeniería acústica: Tipos de ruido en edificación» (25 de Marzo de 2013). *Acústica Fácil*. <http://www.ingenieriaacusticafacil.com/>
- [8] Technal, «Technal en el marco del CTE. Aislamiento Acústico». Hydro Building Systems SL.
- [9] Ministerio de Vivienda, «Documento Básico DB HR Protección frente al ruido», Código Técnico de la Edificación (Abril de 2009).
- [10] AENOR, «Norma UNE-EN ISO 163286-1:2014 “Medición *in situ* del aislamiento acústico en los edificios y el los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo” » (Septiembre de 2014).
- [11] Brüel & Kjær. «Sound Sources and Impact Sound Source for Building Acoustics».
- [12] AENOR, «Norma UNE-EN 61672-1:2014 Electroacústica. Sonómetros. Parte 1: Especificaciones».
- [13] AENOR, «Norma UNE-EN ISO 3382-2:2008 "Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios"» (Diciembre 2008).
- [14] Mariano Francisco Álvarez Santos, «Proyecto fin de máster. Valores únicos de aislamiento acústico.- Evolución, desarrollo, expectativas y propuestas de cambio para un futuro cercano», (Julio 2013).
- [15] AENOR, «Norma UNE-EN ISO 717-1:2013 Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo» (Julio 2013).
- [16] Robert Bartí Domingo, «Acústica medioambiental. Vol. 1 "»». Ed Club Universitario (28 Diciembre 2010)
- [17] AENOR, «Norma UNE-EN ISO 226:2013 "Acústica. Líneas isofónicas normales "» (Septiembre 2013).

- [18] Santiago Expósito Paje, Jerónimo Expósito Paje, Antonio Pedrero González, Miguel Arana Burgui, Nico van Oosten, Moisés Bueno Pacheco, Juan Vicente Sánchez Pérez, César Díaz Sanchidrián, «Innovación para el control del ruido ambiental». Ed Universidad de Castilla-La Mancha (2013)

GLOSARIO

ISO: International Organization for Standardization

UNE-EN: Una Norma Española-Norma Europe

RD: Real Decreto

DB HR: Documento Básico Protección frente al ruido

CTE: Código Técnico de la Edificación

EEA: Europea de Medio Ambiente

ETC LUSI: European Topic Centre on Land Use and Spatial Information

NOISE: Noise Observation and Information Service for Europe

NBE-CA: Normativa Básica de la Edificación-Condiciónes Acústicas

IEC: International Electrotechnical Commission

MLS: Secuencia de Longitud Maxima (Maximun Length Sequence)

ISO/R: International Organization for Standardization/Rusia

ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares

SPL: Nivel de presión sonora

ANEXO A. PONDERACIÓN FRECUENCIAL

En el siguiente anexo se ha explicado la ponderación frecuencial usada en el campo de las mediciones acústicas para su correcta adquisición, procesado e interpretación de la información.

Los analizadores y medidores acústicos se intentan aproximar a la respuesta subjetiva del oído humano, ya que la sensibilidad es mayor para las frecuencias medias y altas que para las bajas. Por tanto, se desarrolló una red de ponderación de frecuencias, denominadas A, B, C, D y Z, que modifican el espectro de la señal eléctrica similar a las diferencias de sensibilidad del oído.

Dependiendo de las zonas de sensibilidad la red de ponderación A se usa para sonidos de baja sonoridad, la B para sonidos de sonoridad media, la C para sonidos de alta sonoridad y la red de ponderación D para sonidos de muy alta sonoridad.

La sonoridad es una medida subjetiva de la intensidad con la que un sonido es percibido por el oído humano, es decir, la medida de “como suena” el sonido, la cual se mide en Sons. Por otro lado el nivel de sonoridad es la expresión de la sonoridad en decibelios cuya unidad es el fon o fonio. La representación de estos niveles de presión sonora de igual sonoridad para las diferentes frecuencias del espectro audible del oído, son las curvas isofónicas.

Estas curvas se consiguen comparando dos tonos, uno de referencia de 1kHz y otro de la frecuencia que se está analizando. Por tanto, un tono de 60fon (curva de 60fons de la figura A.1) genera la misma sensación de sonoridad que uno de 1kHz, con un nivel de presión sonora de 60dB, teniendo todos los puntos sobre la curva, en las distintas frecuencias, la misma sensación de sonoridad. [16]

Las curvas de igual sonoridad están estandarizadas en la Norma UNE-EN ISO 223:2013 “Acústica. Líneas isofónicas normales”, se muestran en la figura A.1.

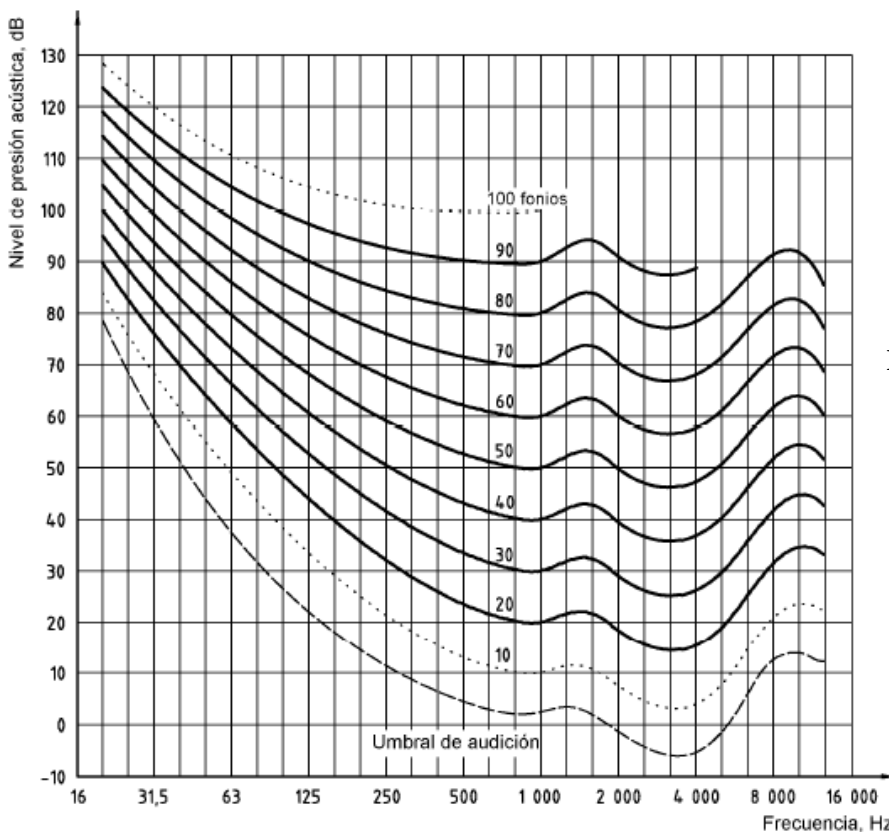


Figura A.1 Curvas isofónicas [18].

Las redes de ponderación se obtienen a partir de las curvas isofónicas, descritas para cada una de ellas en la tabla A.1.

Tabla A.1. Clasificación ponderación frecuencial.

Red de Ponderación frecuencial		
Ponderación	Nivel de presión sonora	Descripción
A	Bajo	Usa la curva de igual sonoridad de 40 fonios.
B	Medio	Usa la curva de igual sonoridad de 70 fonios.
C	Alto	Usa la curva de igual sonoridad de 100 fonios.
D	Aplicaciones especiales	Usada para la medición de ruido aeronáutico. Penaliza bastante las frecuencias altas.
Z	-	Ponderación lineal. No se aplica ninguna corrección frecuencial a la señal.

Para obtener las curvas de ponderación, se normalizan las curvas a 0 dB, las invertimos y por último interpolamos. Éstas tienen de referente la frecuencia de 1000Hz, es decir, que la medición para esta frecuencia tiene una ganancia de 0dB ponderada con respecto a la medición original lineal, vea la figura A.2.

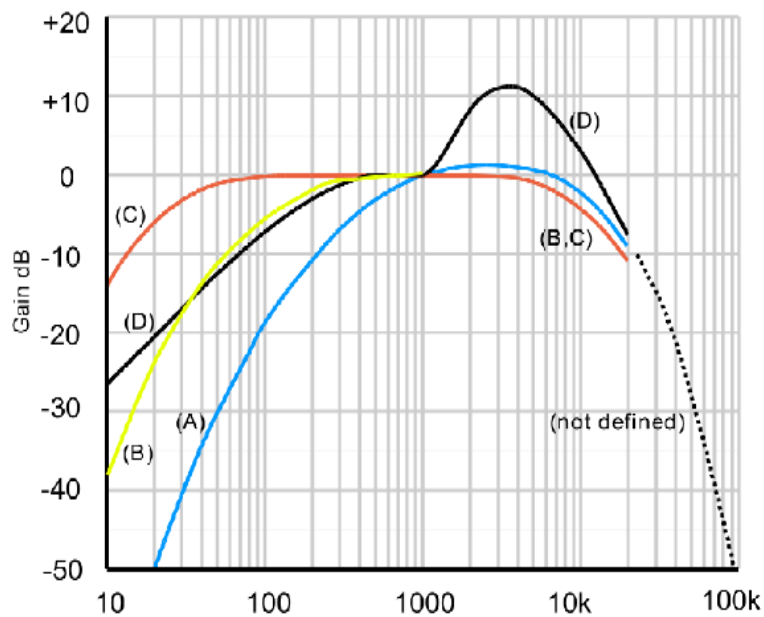


Figura A.2 Curvas de ponderación frecuencial. Curva azul es la ponderación A, amarilla la B, naranja la C y

Las ponderaciones se aplican de forma directa a las mediciones para obtener los decibelios ponderados, dB(A), dB(B), dB(C) o dB(D).

Los sonómetros tienen las redes de ponderación A, C y Z, las cuales son exigidas según la norma UNE-EN ISO 61672-1:2014.

La primera es la más usada en las mediciones acústicas ya que tiene en cuenta la sensibilidad del oído humano, dando mayor relevancia a las altas y medias frecuencias, que a las bajas frecuencias. La red de ponderación C permite detectar la existencia de energía de baja frecuencia en el sonido evaluado. Como podemos ver en la figura A.2, las curvas de ponderación A y C son parecidas para frecuencias medias y altas, pero para las bajas frecuencias la red de ponderación A las atenúa mucho más que la C, ya que el oído es más sordo a las bajas frecuencias y por tanto, necesita un nivel de presión sonora mayor en comparación con las frecuencias altas.

En ocasiones se necesita medir la presión sonora sin aplicar ninguna ponderación en frecuencia, por ello se incorporó la ponderación Z, anteriormente denominada como Lineal o Lin. Ésta no aplica ninguna corrección al espectro de la señal procedente del micrófono [18].

ANEXO B. RESULTADOS

En este anexo se muestra los resultados que hemos obtenido en las mediciones in situ a ruido aéreo en las plantillas que nos exige la norma UNE-EN ISO 163286-1:2014 “Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y el los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo”.

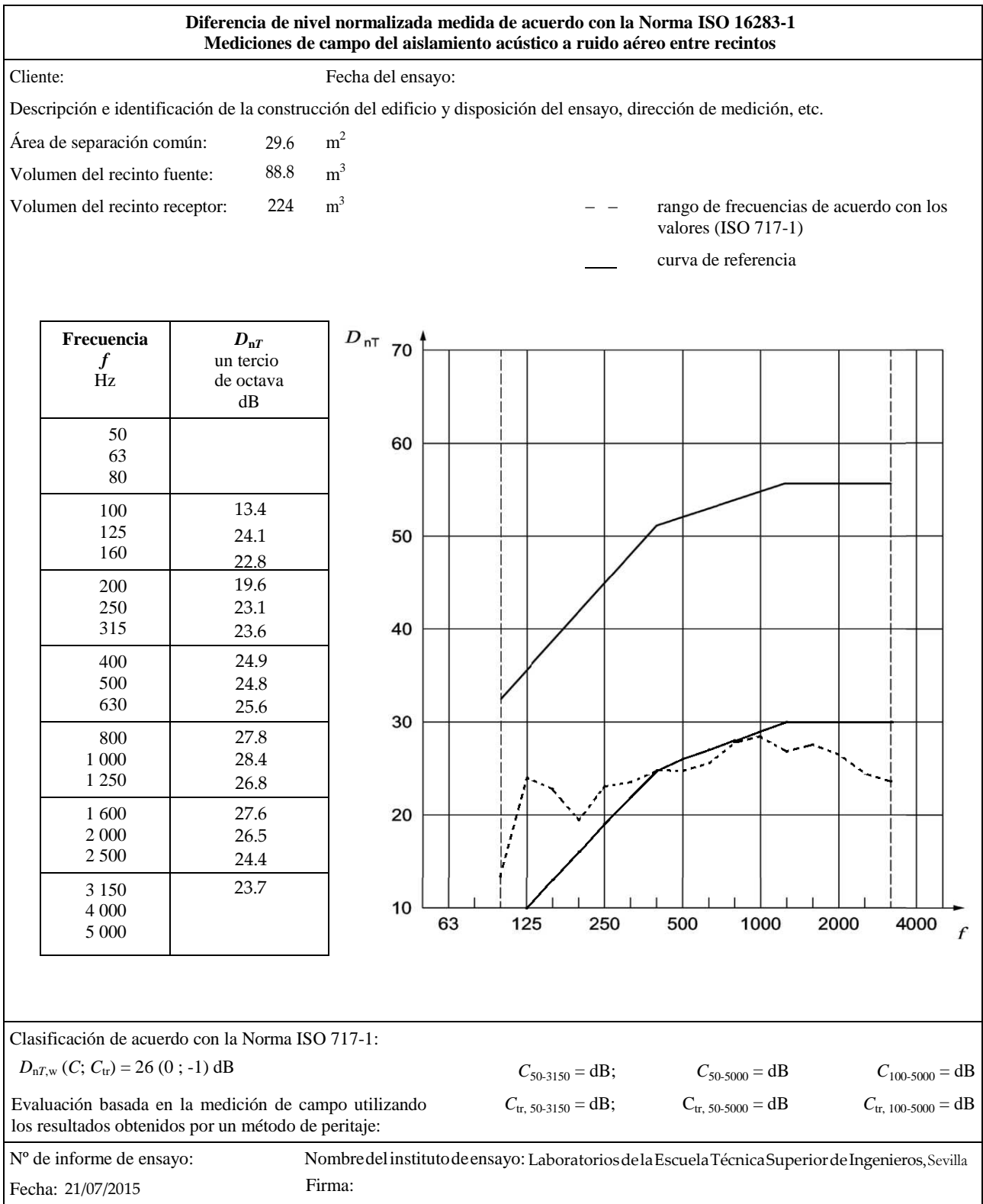


Figura B.1 Diferencia de nivel normalizada junto con la curva de referencia desplazada.

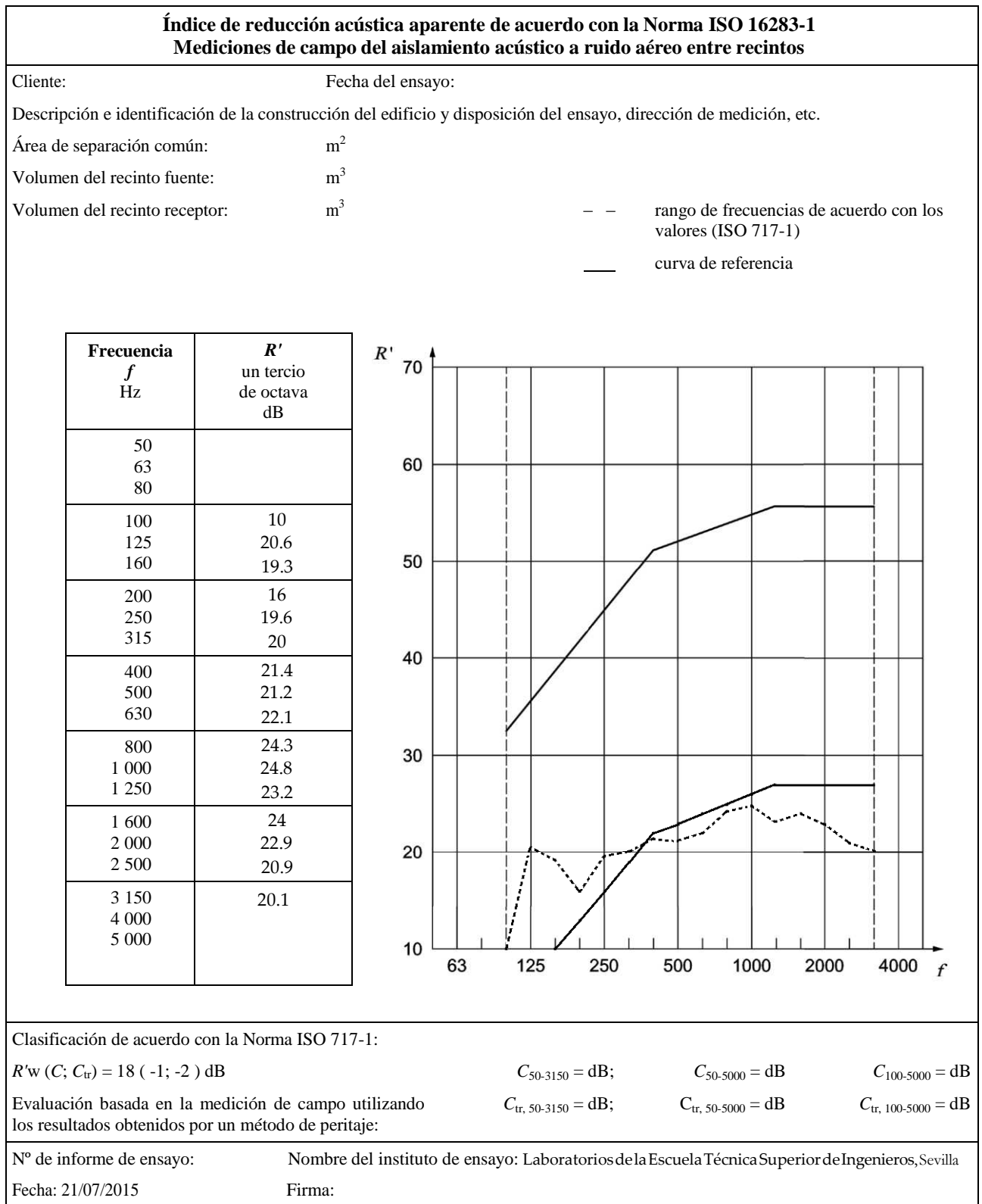


Figura B.2 Índice de reducción acústica aparente junto con la curva de referencia desplazada.

ANEXO C. CÓDIGO DEL CÁLCULO DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN

En este último anexo mostramos el código del sistema de medición del tiempo de reverberación que hemos desarrollado. Éste ha sido programado con el programa Matlab.

Como se ha comentado en apartados anteriores, para el cálculo del tiempo de reverberación hemos usado el procedimiento del método de ruido interrumpido que consiste en realizar el número de mediciones requeridas para obtener las curvas de decrecimiento, hacer un promedio de ellas y así obtener el tiempo de reverberación a partir del método de ajuste de mínimos cuadrados.

Para obtener las curvas de decrecimiento, registramos las señales, mediante el sonómetro, generando un ruido continuo rosa con una fuente dodecaédrica desactivada en un instante determinado y en las distintas posiciones que la norma nos exige. Posteriormente las filtramos con un banco de filtro de 1/3 de octava ya que el análisis de aislamiento acústico se realiza en bandas de un tercio de octava, obteniendo los niveles de presión acústica para cada banda. Después se ha estimado la potencia promedio localizada de cada señal en cada una de sus bandas en intervalos de 1000 muestras y le hemos aplicado un diezmado con un filtro de promediado mediante la función *potenciaSuavizada*.

```

%% Calculo de las potencias suavizadas de cada señal en las bandas indicadas
load('talple1.mat'); %cargamos la señal
%La filtramos con un filtro de 1/3 octava
[yw, f] = banco3(sw1, Fs, N, F0);
%Estimamos su potencia localizada en intervalos de 1000 muestras
for i=1:length(F0)
PyywS(:,i)= potenciaSuavizada(yw{i});
end

load('talp2e1.mat');
[yw, f] = banco3(sw1, Fs, N, F0);
for i=1:length(F0)
Pyyw2S(:,i)= potenciaSuavizada(yw{i});
end

load('talp3e1.mat');
[yw, f] = banco3(sw1, Fs, N, F0);
for i=1:length(F0)
Pyyw3S(:,i)= potenciaSuavizada(yw{i});
end

load('ta2ple1.mat');
[yw, f] = banco3(sw1, Fs, N, F0);
for i=1:length(F0)
Pyyw4S(:,i)= potenciaSuavizada(yw{i});
end

load('ta2p2e1.mat');
[yw, f] = banco3(sw1, Fs, N, F0);
for i=1:length(F0)
Pyyw5S(:,i)= potenciaSuavizada(yw{i});
end

load('ta2p3e1.mat');
[yw, f] = banco3(sw1, Fs, N, F0);
for i=1:length(F0)
Pyyw6S(:,i)= potenciaSuavizada(yw{i});
end

```

```
function PyywS = potenciaSuavizada(yw)
Pyyw= filter(ones(1,1600)/1600,1,yw.^2);
Pyyww=Pyyw(1001:end,:); %Eliminamos las colas iniciales

Pyyww=Pyyww(1:1000:end,:);
%Suavizamos más aún las curvas con un filtro de promediado
Pyyww=filter(ones(1,4)/4,1,Pyyww);
PyywS=Pyyww(4:end);
end
```

Hemos pasado las potencias en cada banda de frecuencia a escala logarítmica para obtener así las curvas de decrecimiento.

Una vez obtenidas éstas, para realizar el promedio elegimos la segunda forma que la norma describe al ser el método preferido, explicado en el apartado 5.5.

Para hallar la media del conjunto de los decrecimientos de presión acústica al cuadrado, primero alineamos los decrecimientos en cada banda de frecuencia, como hemos explicado en el apartado 7.2.2.

```
function [Pali] = alineamiento(PyywS,Pyyw2S,Pyyw3S,Pyyw4S,Pyyw5S,Pyyw6S)

L=size(PyywS,1);
nbandas=size(PyywS,2);
nmedic=6;
%Guardamos en un tensor las potencias obtenidas
P=zeros(L,nbandas,nmedic);
P(:,:,1)=PyywS;
P(:,:,2)=Pyyw2S;
P(:,:,3)=Pyyw3S;
P(:,:,4)=Pyyw4S;
P(:,:,5)=Pyyw5S;
P(:,:,6)=Pyyw6S;

%% Suavizado para hallar promedios en las zonas planas
x=filter(ones(100,1)/100,1,10*log10(P)); % el 100 es un parámetro que se
puede modificar
x=x(200:100:end,:,:);

%% Buscamos el punto de -5dB en la pendiente
for p=1:nbandas
    [PM1,i1]= buscaPuntoReferencia(P(:,p,1),x,p,1);
    [PM2,i2]= buscaPuntoReferencia(P(:,p,2),x,p,2);
    [PM3,i3]= buscaPuntoReferencia(P(:,p,3),x,p,3);
    [PM4,i4]= buscaPuntoReferencia(P(:,p,4),x,p,4);
    [PM5,i5]= buscaPuntoReferencia(P(:,p,5),x,p,5);
    [PM6,i6]= buscaPuntoReferencia(P(:,p,6),x,p,6);

PM=[PM1,PM2,PM3,PM4,PM5,PM6];
i={i1,i2,i3,i4,i5,i6};
Pr=find(min(PM));
%Alineamos las curvas a partir de la curva de referencia
for k=1:nmedic
    if(Pr ~= k)
        T1=PM(Pr)+ i{Pr}(end);
        T2=PM(k)+ i{k}(end);
```

100

```

        T=T2-T1;
        Pali(:,p,k)=P(T:end,p,k);
    else
        Pali(:,p,k)=P(1:end-T+1,p,k);
    end
end
end
end
end

```

```

function [PM,i] = buscaPuntoReferencia(P)
%Busca el punto de referencia, el punto donde la curva decae 5dB
L=size(P,1);
n=10*log10(mean(P(1:find(x(:,p,q))>=1*x(1,p,1), 1, 'first')*100,p));
%Pendiente de la curva
k=find(10*log10(P(:,p))>=n);
M=P(k(end):end,p);
%Pendiente de la curva -5dB
i1=find(10*log10(M(:,1))>=n-5);
PM=L-length(M);
end

```

Alineadas las curvas hallamos el promedio de éstas, sumando todas y dividiendo por el número total de curvas, obteniendo la curva media para cada frecuencia.

```

T20=zeros(1,Nfc);
for j=1:Nfc

Pali=alineamiento(PyywS,Pyyw2S,Pyyw3S,Pyyw4S,Pyyw5S,Pyyw6S);
Nm=size(Pali,1);
t2=0:(tiempo/Nm):tiempo;
t2=t2(1:end-1);
figure
subplot(1,2,1)
hold on
plot(t2,10*log10(squeeze(Pali(:,j,1))/(po^2)),'b');
plot(t2,10*log10(squeeze(Pali(:,j,2))/(po^2)),'r');
plot(t2,10*log10(squeeze(Pali(:,j,3))/(po^2)),'g');
plot(t2,10*log10(squeeze(Pali(:,j,4))/(po^2)),'m');
plot(t2,10*log10(squeeze(Pali(:,j,5))/(po^2)),'y');
plot(t2,10*log10(squeeze(Pali(:,j,6))/(po^2)),'c');

hold off
axis([0 tiempo -10 90])
title('Curvas')

%La media de las curvas
M=(Pali(:,j,1)+Pali(:,j,2)+Pali(:,j,3)+Pali(:,j,4)+Pali(:,j,5)+Pali(:,j,6))./
6;
subplot(1,2,2)
plot(t2,10*log10(M(:,1)/(po^2)));
axis([0 tiempo -5 90])
title(['Media ',int2str(F0(j)),' Hz'])

% Estimacion del tiempo de reverberacion T20 s
T20(j)=minimosCuadrados(M);
end

```

Por último, estimamos el tiempo de reverberación en el rango de evaluación T20, el cual nos exige la norma, a partir del método de mínimos cuadrados, explicado en el apartado 5.5, programado en una función denominada *minimosCuadrados*.

```
function T20=minimosCuadrados(M)
%% Metodo de los minimos cuadrados
% Li: nivel de regresion de la muestra i en dB
% a: interseccion de la recta
% b: es la estimación de la pendiente, dB/s
% ti: es el tiempo, segundos, de la muestra i
% Fs: frecuencia de muestreo
% po: presion acustica
Fs=48000;
po=2e-5;

%% Nivel promedio del rango de evaluacion
% Suavizado para hallar promedios en las zonas planas
% 100 es un parámetro que se puede modificar
x=filter(ones(100,1)/100,1,10*log10(M));
x=x(100:100:end,:);

%Promedio en la zona alta; el valor 1.05 es modificable
n=10*log10(mean(M(1:find(x(:,1))>=1.5*x(1),1,'last')*100));
%Pendiente de la curva
k=find(10*log10(M)>=n);
M1=M(k(end):end);
%Pendiente de la curva -5dB
i=find(10*log10(M1)>=n-5);
M1=M1(i(end):end);
Nm1=length(M1);
%Rango de evaluación
j=find(10*log10(M1)>=(n-25),10,'first');
M1=M1(1:j(end));
M1=10*log10(M1/po^2);
Nm2=length(M1);
Dm=Nm1-Nm2;
%Nivel promedio
N=length(M1);
Lpromedio=sum(M1)/N;

%% Tiempo promedio
%Cargamos la señal para obtener el tiempo total que dura la señal
load('talple2.mat');
Ns=size(sw1,1);
tiempo=Ns/Fs;
t=0:1/Fs:tiempo;

%Cargamos la media de las curvas que tambien tarda lo mismo que la señal
Nm=size(M,1);
t2=0:(tiempo/Nm):tiempo;
c=k(end)+i(end);
t3=t2(1,c:end-Dm);
%Tiempo promedio
Nt=size(t3,2);
tpromedio=sum(t3)/Nt;
```

102

```
%% Estimacion de la pendiente dB/s
bn=sum(t3'.*Ml)-N*tpromedio*Lpromedio;
bd=sum(t3.^2)-N*tpromedio^2;
b=bn/bd;

%% Interseccion de la recta
a=Lpromedio-b*tpromedio;

%% Estimacion de la recta
Li=a+b.*t3;
%% Estimacion del tiempo de reverberacion T20 s
T20=-60/b;
end
```