

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA (T1)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE ACÚSTICA EN LA EDIFICIACIÓN

Acústica Arquitectónica

Edición 2010-2011

Profesor: Juan M. Navarro

UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN ANTONIO DE MURCIA



Contenido

1. PRESENTACIÓN DE LA ASIGNATURA.....	4
2. REPASO DE ACÚSTICA FÍSICA	5
2.1 Conceptos fundamentales	5
2.1.1 Sonido	5
2.1.2 Presión acústica	6
2.1.3 Periodo y frecuencia.....	7
2.1.4 Velocidad de propagación (c) y velocidad del sonido (u)	7
2.1.5 Longitud de onda.....	9
2.1.6 Impedancia acústica.....	9
2.1.7 Sonidos periódicos y tonos puros	10
2.1.8 Potencia sonora	12
2.1.9 Intensidad sonora.....	12
2.1.10 Nivel de presión sonora	14
2.1.11 Espectro de los sonidos	15
2.1.12 Fuentes sonoras.....	17
3. REPASO ACÚSTICA FISIOLÓGICA	20
3.1 Conceptos fundamentales	20
3.1.1 Audición.....	20
3.1.2 Bandas de frecuencias.....	22
3.1.3 Intensidad.....	23
3.1.4 Sonoridad	25
3.1.5 Efecto de enmascaramiento	29
3.1.6 Molestia	29
3.1.7 Vibraciones.....	30
4. ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA.....	32
4.1 Fundamentos de acondicionamiento.....	34
4.1.1 El campo sonoro en recintos.....	34



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

4.2 Fundamentos de Aislamiento	39
4.3 Fuentes de ruido	42
4.3.1 Fuentes de ruido externas a la edificación	42
4.3.2 Fuentes de ruido internas a la edificación	46
5. ENUNCIADO PROBLEMAS	56
5.1 Problema 1	56
5.2 Problema 2	56
5.3 Problema 3	56
6 SOLUCIONES PROBLEMAS	56
6.1 Problema 1	56
6.2 Problema 2	57
6.3 Problema 3	57



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

1. PRESENTACIÓN DE LA ASIGNATURA

Entendemos por contaminación la “liberación artificial” en el medio ambiente, de sustancias o energías, que causan efectos adversos sobre el hombre o sobre el medio ambiente, directa o indirectamente.

Entre estos agentes contaminantes, el ruido es quizás el menos estudiado, pero no por ello el menos nocivo.

La aplicación de la acústica para estudiar y luchar contra ruido y la contaminación acústica no es reciente pero parece bastante “ineficaz” dado que España somos el país más ruidoso de Europa y el segundo del mundo después de Japón.

Aspectos subjetivos:

- Sensación de molestia, no enfermedad ni daño pero acarrea problemas psicológicos.
- Sordera profesional por exposiciones prolongadas a niveles elevados de ruido. (HyS en el trabajo).

A los 55 dBA el 10% de la población afectada siente molestias, mientras que a los 85 dBA el 100% de los afectados sienten molestias.

Ruido más importante en las ciudades:

Ruido de tráfico domina sobre las demás fuentes sonoras en el 80% de la superficie de la ciudad.

Las recomendaciones van en el sentido de reducirlos hasta un valor máximo de **65 dBA** como nivel equivalente diurno en las fachadas de los edificios.

Para conseguir esto se debe trabajar e investigar en los siguientes frentes:

- Cursos de Formación de especialistas en diseño, planificación, ejecución y comprobación.
- Educación desde las escuelas.
- Estudiando y mejorando las fuentes de ruido.
- Control y planificación urbanística.

El **objetivo principal** de esta asignatura es iniciar al alumno en la realización y certificación de proyectos de acústica en la edificación.

Como objetivos **secundarios** cabe destacar:

- Diferenciar acondicionamiento de aislamiento.
- Aprender técnicas prácticas de acondicionamiento y aislamiento.
- Identificar la legislación y las normas.
- Aprender las metodologías de diseño y medición “in situ”.



2. REPASO DE ACÚSTICA FÍSICA

2.1 Conceptos fundamentales

2.1.1 Sonido

El **sonido** consiste en una vibración del aire que se propaga en forma de ondas de presión. En ausencia de sonido, la presión atmosférica alcanza un estado de equilibrio y es constante en el tiempo y en el espacio. Cuando aparece una perturbación, por ejemplo la vibración de un objeto, se producen variaciones de presión y estas variaciones no sólo se producen a lo largo del tiempo (acompañando a la perturbación) sino que se propagan también por el espacio con cierta velocidad c , de tal modo que al cabo de un tiempo t las variaciones de presión llegan a una distancia $c \cdot t$ de donde se produjo originalmente la perturbación.

El proceso puede examinarse con mayor detalle comparándolo con el fenómeno que tiene lugar cuando se perturba la superficie calma de un lago. Si la perturbación eleva un punto cualquiera de la superficie, el agua en ese punto tenderá a caer, pero en su caída elevará las zonas vecinas, que a su vez tenderán a caer elevando las zonas que le siguen, y así sucesivamente la perturbación se propaga en forma de un círculo de radio creciente.

El caso de una perturbación del aire es muy similar. Si en un punto cualquiera se produce una perturbación del aire que implique un aumento momentáneo de la presión, el desequilibrio entre las presiones en el punto perturbado y en el aire que lo circunda hace que el aire a mayor presión tienda a descomprimirse, perturbando a su vez al aire a su alrededor. Así siguiendo, la perturbación se va desplazando o propagando. En la figura 1.1 se muestra esta situación dentro de un tubo largo, en uno de cuyos extremos hay un pistón por medio del cual se provoca la perturbación. En **(a)** el aire está en situación de equilibrio. En **(b)** sobreviene la perturbación, comprimiendo el aire próximo al pistón. En **(c)** a **(e)** la perturbación se aleja de la fuente (el pistón)

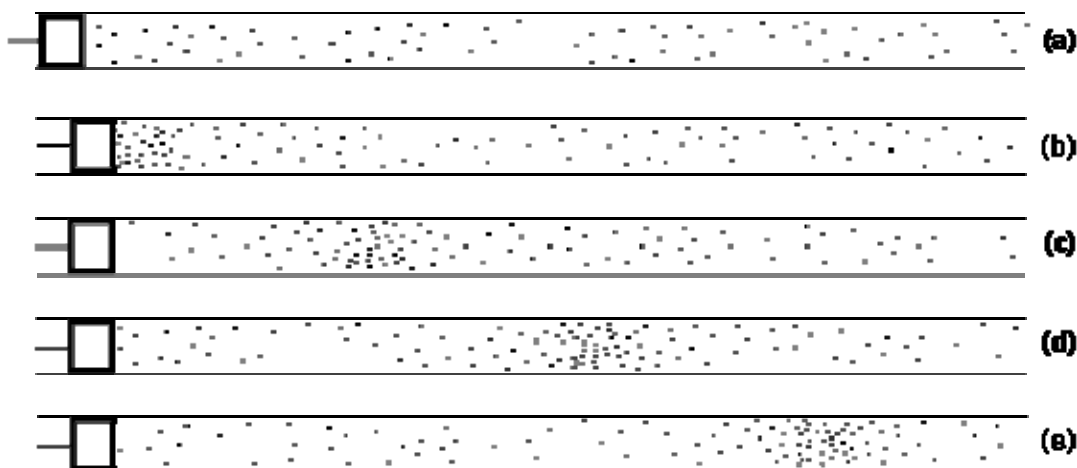


Figura 1.1. Propagación de una perturbación en un tubo. (a) El aire en reposo (moléculas repartidas uniformemente). (b) Ante una perturbación el aire se concentra cerca del pistón. (Aumenta la presión). (c), (d), (e) La perturbación se propaga alejándose de la fuente.

Una determinación simple: «Se entiende por sonido una variación de la presión ambiental que se propaga en forma de ondas».



Más científicamente se puede definir: «El sonido es un fenómeno vibratorio que, a partir de una perturbación inicial del medio elástico donde se produce, se propaga, en ese Medio, bajo la forma de una variación periódica de presión»

2.1.2 Presión acústica

Como hemos visto, la perturbación consiste en una variación de la presión **P** del aire respecto a la presión de equilibrio (o presión atmosférica), **P_o**. Físicamente, podemos pensar que el sonido es consecuencia de la aparición de una **presión incremental**

$$p = P - P_o$$

que varía en el tiempo. Es interesante observar que para los sonidos habituales *dicha presión incremental es mucho menor en magnitud que la presión atmosférica*. En efecto, mientras que ésta es del orden de

$$P_o = 105 \text{ Pa}$$

(**Pa = pascal = N/m²**), la presión incremental correspondiente a sonidos audibles (sin llegar a provocar dolor) está en el rango

$$30 \times 10^{-6} \text{ Pa} < p < 30 \text{ Pa} ,$$

por lo cual

$$p \ll P_o$$

(Ver figura 1.2. (a)). Por ejemplo, para una conversación normal, la presión incremental es del orden de **0,03 Pa**.

NOTA: En lo sucesivo, llamaremos **presión sonora**, **presión acústica** o simplemente **presión** a la presión incremental. Para referirnos a la presión de equilibrio que tiene lugar en ausencia de sonido utilizaremos la expresión **presión atmosférica**. En la figura 1.2 (b), se ha restado la presión atmosférica **P_o**, dejando sólo el valor de la presión sonora **p**.

Para su medida se utilizan magnitudes más cómodas que el kg/cm² o «bar». Se usa generalmente el microbar (μbar), que es la millonésima parte del bar (1 μbar=10⁻⁶ bar), o el pascal (Pa) (1 Pa=1 N/m²=10 μbar).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

2.1.3 Periodo y frecuencia

Si representamos gráficamente una oscilación cualquiera (ver figura 1.2), se llama período (T) al tiempo que se tarda en realizar un ciclo completo. Se mide en segundos (s).

La frecuencia (f) es el número de ciclos que se realizan en un segundo. Es, por tanto, la inversa del período:

$$f = \frac{1}{T}$$

Se mide en ciclos por segundo (cps), que se denomina normalmente hercios (Hz).

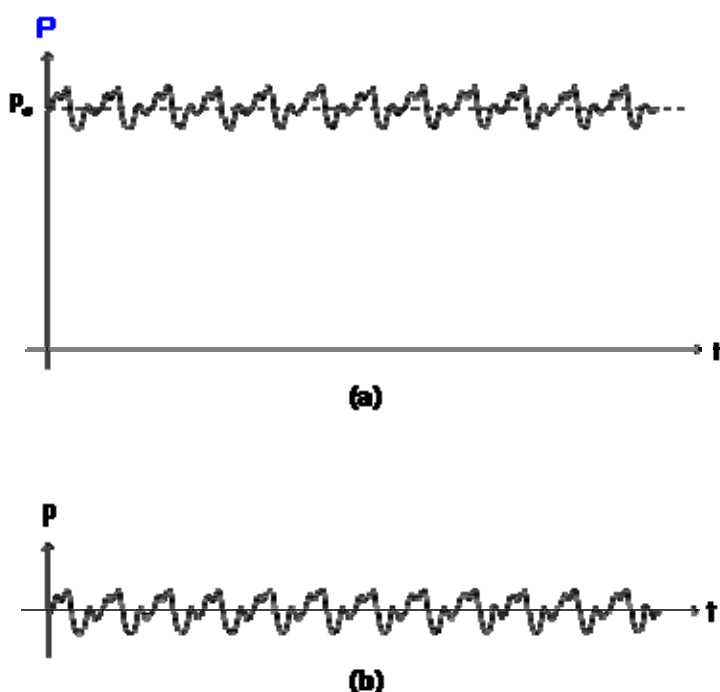


Figura 1.2. (a) Evolución en el tiempo de la presión de un sonido. Se muestra (fuera de escala) una pequeña fluctuación periódica alrededor de la presión atmosférica P_0 (presión de equilibrio). (b) Se ha removido la presión atmosférica quedando sólo la presión sonora p .

2.1.4 Velocidad de propagación (c) y velocidad del sonido (u)

La velocidad de propagación (c) del sonido es la velocidad con que se desplazan las ondas sonoras. Tiene la dirección perpendicular a la superficie vibrante bajo forma de ondas. Dentro de unos grandes límites, esta velocidad es independiente de la magnitud de la presión acústica.

Depende de las condiciones ambientales (presión y temperatura) y, fundamentalmente, del medio donde se propaga, llamado «campo acústico».

Para un ambiente normal ($P=1$ atm $T=20$ °C), damos, a título de ejemplo, la tabla siguiente para algunos elementos:



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

<u>Medio</u>	Velocidad [m/s]
Aire a 0 °C	332
Aire a 20 °C	344
Anhídrido carbónico	260
Hidrógeno	1294
Agua a 20 °C	1482
Alcohol etílico a 20°	1170
Vapor a 100 °C	405
Acero	5200
Aluminio	5000
Bronce	3480
Corcho	500
Hormigón	3500
Granito	3950
Madera	4000
Mármol	3810
Plomo	1190
Vidrio	5000

TABLA 1.1. Velocidad del sonido para ondas planas en varios medios

Cuando el medio de propagación es el aire, el valor usado habitualmente es 344 m/s.

La propagación de una onda sonora **no implica** un desplazamiento neto de las partículas (moléculas) que forman el aire, *sino de la perturbación*. En otras palabras, no existe propagación de materia, como sucede en cambio en una ráfaga de viento o en el flujo de aire a través de una tubería de ventilación.

Sin embargo, cuando por un punto pasa una perturbación, las partículas correspondientes experimentan, realmente, un pequeño desplazamiento respecto a su posición de equilibrio. Al terminar la perturbación, cada partícula vuelve a su estado original.

El movimiento de una partícula alrededor de su posición de equilibrio podría describirse por medio de la distancia respecto a dicha posición en cada instante (**elongación**), pero resulta más conveniente hacerlo en términos de la **velocidad u**. Una de las razones es que para una onda plana la presión resulta ser proporcional a la velocidad:

$$\frac{p}{u} = \rho_0 c$$

Donde ρ_0 = densidad del aire en $\text{kg/m}^3 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (a 20 °C)

C = velocidad de propagación del sonido en $\text{m/s} = 344 \text{ m/s}$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

El cociente p/u se denomina **impedancia acústica**, Z_a :

$$Z_a = \frac{p}{u} \quad (1.5)$$

De las ecuaciones anteriores puede deducirse que para una conversación normal, cuya presión sonora es de unos **0,030 Pa**, la velocidad de las partículas es del orden de **0,00007 m/s**. Este pequeño valor contrasta con el mucho más elevado de **344 m/s** correspondiente a la velocidad de propagación de la onda sonora.

2.1.5 Longitud de onda

La distancia que recorre una onda sonora en el tiempo de un período es lo que se llama longitud de onda (λ).

Por tanto, esta longitud de onda dependerá de la velocidad de propagación (c) y del período (T), o su inversa, la frecuencia (f).

$$c = f \cdot \lambda$$

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}$$

Se mide en unidades de longitud (m).

2.1.6 Impedancia acústica

Cada medio, sólido, líquido o gaseoso, ofrece una facilidad más o menos grande para la propagación del sonido. Por analogía con la corriente eléctrica, se dice que el medio posee una impedancia acústica (Z_a).

La impedancia se define como el cociente entre la presión acústica (P) y la velocidad propia del movimiento vibratorio definida antes como velocidad del sonido (u). Es decir:

$$Z_a = \frac{P}{u}$$

que para el caso de ondas planas se puede expresar también por:

$$Z_a = \rho \cdot c$$

siendo ρ la masa volumétrica (densidad), y c la velocidad de propagación de la onda en aire. NOTA: no confundir con v que es la velocidad de vibración de las partículas en el movimiento ondulatorio.

Se mide en Ohmios Acústicos, $g/(s \cdot cm^2)$, o en Rayls, $(Pa \cdot s)/m$.

A continuación, damos una tabla con los valores para algunos elementos:



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

SUSTANCIA	IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA	
	g/(s · cm ²)	(Pa · s)/m
SÓLIDOS		
Hierro fundido	270 · 10 ⁴	270 · 10 ⁵
Hierro forjado	400 · 10 ⁴	400 · 10 ⁵
Cinc	240 · 10 ⁴	240 · 10 ⁵
Acero	390 · 10 ⁴	390 · 10 ⁵
Granito	162 · 10 ⁴	162 · 10 ⁵
Mármol	99 · 10 ⁴	99 · 10 ⁵
LÍQUIDOS		
Agua (13 °C)	144 · 10 ³	144 · 10 ⁴
Agua salada	155 · 10 ³	155 · 10 ⁴
GASES		
Aire a 0 °C	42,7	427
Aire a 20 °C	41,4	414
Vapor de agua	23,5	235

TABLA 1.2. Valores de impedancia características de sustancias.

2.1.7 Sonidos periódicos y tonos puros

Un caso muy importante se da cuando las perturbaciones se repiten cada un tiempo **T**, es decir, con una **frecuencia** $f = 1/T$. En este caso, auditivamente se evoca la sensación de **tono**. La sensación de **altura** del tono aumenta con la frecuencia. Así, los sonidos de baja frecuencia son **graves** (bajos), mientras que los de alta frecuencia son **agudos** (altos). En la figura 1.3. se muestran ejemplos de dichos sonidos

La perturbación periódica más simple es la **senoidal** (figura 1.4.), Es decir, aquella en la que la presión varía *senoidalmente* con el tiempo:

$$p(t) = P_{\text{máx}} \text{sen } 2\pi f t.$$

En este caso el sonido resultante se denomina **tono puro**. Los tonos puros se encuentran rara vez en la naturaleza, pero son de extraordinaria importancia como herramienta de análisis, ya que todo sonido puede considerarse como formado por la superposición de tonos puros de diversas frecuencias.

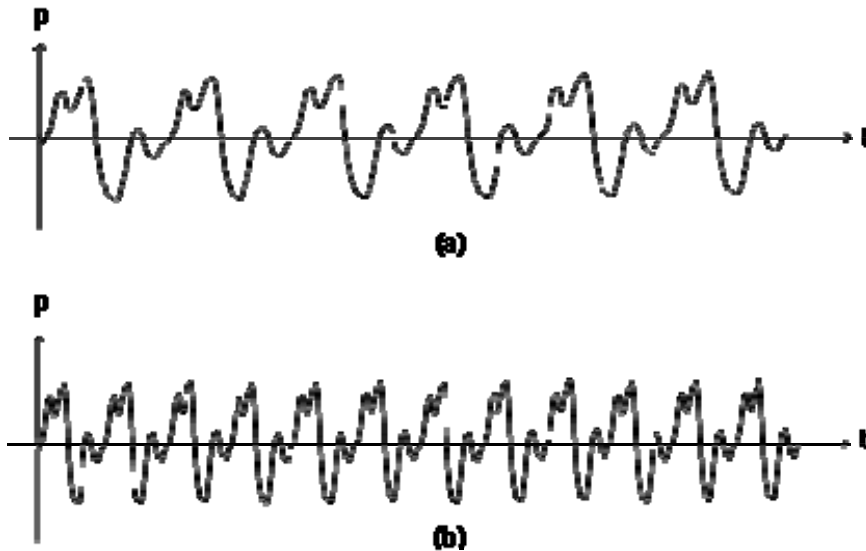


Figura 1.3. Dos sonidos periódicos: (a) grave; (b) agudo.

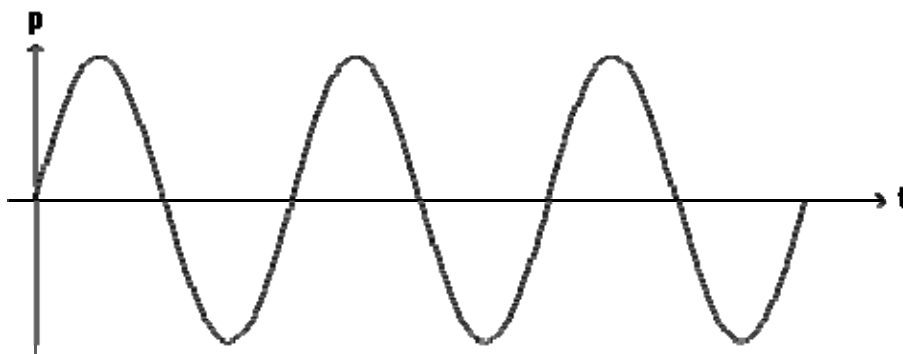


Figura 1.4. Un tono puro (onda senoidal). Se muestran tres ciclos.

Cuando el sonido es periódico de frecuencia f , las frecuencias de los tonos puros que lo constituyen son múltiplos de f , y se denominan **sonidos armónicos** o **sobretonos armónicos**, o simplemente, **armónicos**. Este importante resultado se conoce como **Teorema de Fourier**, y puede expresarse matemáticamente como

$$p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \sin(2\pi n f t + \varphi_n),$$

donde P_n es la **amplitud** y φ_n es la **fase** de cada armónico. Ejemplos de esto son la voz humana cuando se pronuncian vocales y los sonidos de instrumentos musicales como la flauta, el violín, etc.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

La frecuencia f se denomina **frecuencia fundamental**. En la figura 1.5 se muestran los primeros armónicos de una onda cuadrada, y la comparación entre su suma y la propia onda cuadrada.

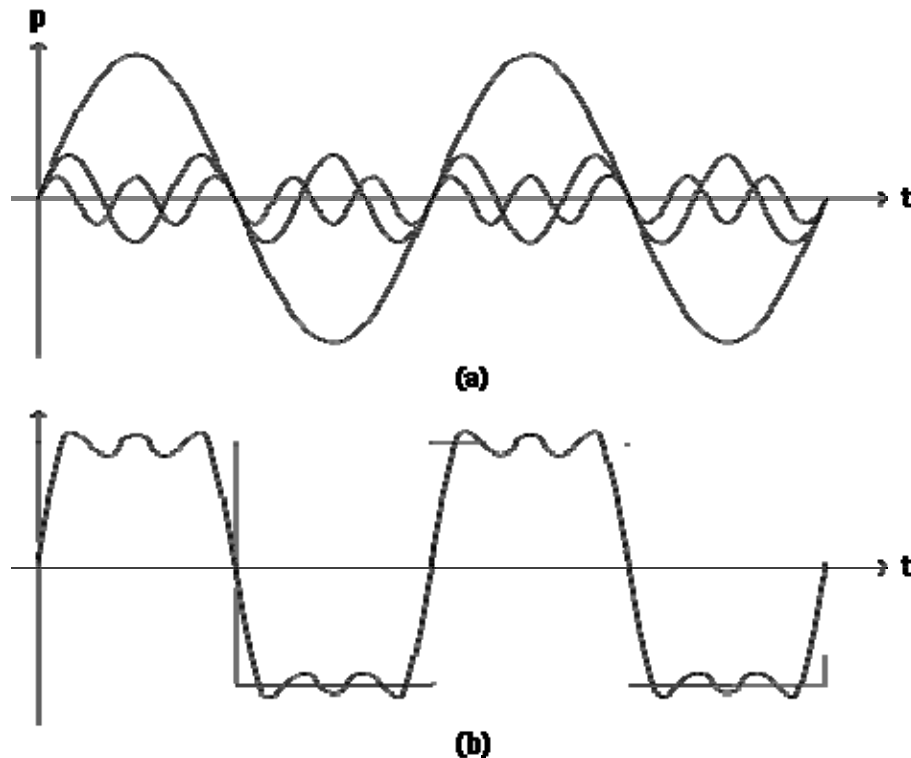


Figura 1.5. (a) Los tres primeros armónicos de una onda cuadrada, de frecuencias f_0 , $3f_0$ y $5f_0$. (b) El resultado de superponer los tres armónicos, comparado con la onda cuadrada. Si bien tres armónicos son poca cantidad, vemos que comienza a esbozarse la forma de la onda cuadrada.

2.1.8 Potencia sonora

Se define como la energía sonora irradiada por unidad de tiempo [W] y es la medida básica de la salida acústica de una fuente. Es un parámetro que depende *exclusivamente* de la fuente que debido al enorme rango de potencias, se suele expresar en decibelios

2.1.9 Intensidad sonora

Dado que en una onda sonora sólo hay energía en los puntos por los que está pasando la perturbación (pues únicamente allí $p \neq 0$), resulta que la energía se va propagando junto con la perturbación. Esta propiedad fundamental se verifica también para otros fenómenos ondulatorios, como los electromagnéticos.

Se define la **intensidad sonora**, i , como la **potencia** (energía por unidad de tiempo) transmitida por una onda por unidad de superficie ($i=W/S$). Para una onda plana resulta:



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

$$i = \frac{p^2}{\rho_o c} = \frac{p^2}{Z_a}.$$

La intensidad sonora varía en el tiempo. Es interesante calcular su valor medio en un intervalo de tiempo T, denominado **intensidad media**, I, que está dado por

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{\rho_o c} \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt.$$

El valor

$$P_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt$$

se denomina **valor cuadrático medio** de la presión. Su raíz cuadrada,

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

es el **valor eficaz** de la presión o también **presión eficaz**. En términos de P_{ef} , la intensidad media vale

$$I = \frac{P_{ef}^2}{\rho_o c}$$

La presión eficaz corresponde a un valor constante capaz de producir la misma intensidad media. Para el caso de un tono puro, en el que la presión *varía senoidalmente*, es decir

$$p(t) = P_{m\acute{a}x} \text{ sen } 2\pi f t,$$

la relación entre la presión eficaz y la máxima resulta ser

$$P_{ef} = \frac{P_{max}}{\sqrt{2}}$$

de modo que

$$p(t) = \sqrt{2} P_{ef} \text{ sen } 2\pi f t.$$

Para un sonido periódico cualquiera, se cumple:



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

$$P_{ef}^2 = \sum_{i=1}^{\infty} P_{efn}^2$$

donde P_{efn} es el valor eficaz del armónico de orden n . Esta importante fórmula, conocida como **fórmula de Parseval**, indica que *la energía de los armónicos puede superponerse para obtener la energía total*.

2.1.10 Nivel de presión sonora

Debido al rango *extraordinariamente amplio* de la presión sonora, resulta conveniente utilizar una escala logarítmica para expresar sus valores. Así, se define el **nivel de presión sonora (NPS)** como

$$NPS = 20 \log_{10} \frac{P_{ef}}{P_{ref}},$$

donde P_{ef} es el valor eficaz de la presión sonora y P_{ref} es la presión de referencia, que vale

$$P_{ref} = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa}.$$

El nivel de presión sonora se expresa en **decibeles (dB)**. Un incremento de **1 dB** no representa un incremento fijo de la presión sino un *aumento relativo* de un **12,2%**.

El valor de P_{ref} se ha elegido porque *coincide con el umbral de audición normal para 1 kHz*, lo cual implica que un sonido se puede percibir cuando **NPS > 0 dB**. En la Tabla 1.3 se dan valores típicos de la presión eficaz sonora y del **NPS** para algunos sonidos habituales.

FUENTE	P_{ef} [Pa]	NPS [dB]
Umbral de dolor	20	120
Discoteca a todo volumen	6,3	110
Martillo neumático a 2 m	3,6	105
Ambiente industrial ruidoso	0,63	90
Piano a 1 m con fuerza media	0,20	80
Automóvil silencioso a 2 m	0,063	70
Conversación normal	0,020	60
Ruido urbano de noche	0,0063	50
Habitación interior (día)	0,0020	40
Habitación interior (noche)	0,00063	30
Estudio de grabación	0,00020	20
Cámara sonoamortiguada	0,000063	10
Umbral de audición a 1 kHz	0,000020	0

TABLA 1.3. Presión Sonora y Nivel de Presión Sonora para algunas fuentes sonoras y ambientes acústicos típicos



2.1.11 Espectro de los sonidos

La información acerca de qué frecuencias integran un sonido y cuáles son las respectivas amplitudes y fases constituye lo que se denomina **espectro** del sonido. Se suele presentar como un par de gráficos con la frecuencia en las abscisas, y en las ordenadas la amplitud o energía en uno y la fase en el otro. Para el análisis de ruidos *la fase carece en general de importancia* pues se considera que las ondas son incoherentes y **no la tendremos en cuenta**.

Existen cuatro tipos de espectros. El primero corresponde a los sonidos **periódicos**. El espectro en este caso (figura 1.6) está formado por líneas verticales equiespaciadas, siendo la primera la correspondiente a la frecuencia fundamental o primer armónico, la segunda al segundo armónico, y así siguiendo. La altura de cada línea espectral es la amplitud del armónico respectivo. Un caso particular lo constituye un tono puro de frecuencia f_0 . En este caso el espectro consta de una sola línea ubicada en f_0 .

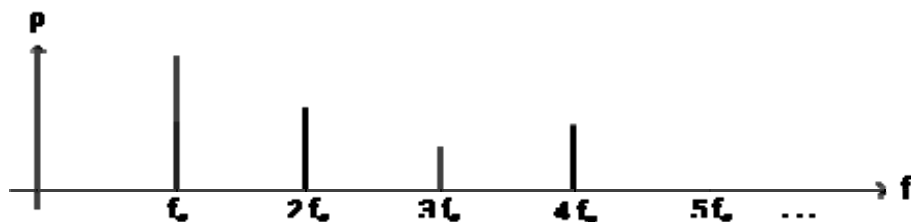


Figura 1.6. Espectro de amplitudes de un sonido periódico.

El segundo tipo de espectro corresponde a los sonidos **no periódicos** con frecuencias identificables. En este caso el espectro contiene líneas espectrales con separaciones no uniformes (figura 1.7). Tanto en este caso como en el anterior el espectro se denomina **discreto**.

El tercer tipo de espectro es el **espectro continuo**, y corresponde a los sonidos *no periódicos* cuyas componentes están demasiado próximas como para poder discriminarse. Una representación mediante líneas espectrales implicaría una gran cantidad de líneas a su vez muy pequeñas (figura 1.8 a). En su lugar se grafica la **densidad espectral** que representa la energía por unidad de frecuencia (figura 1.8 b).

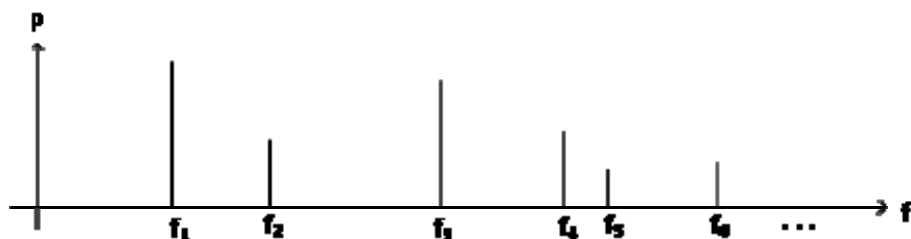


Figura 1.7. Ejemplo de espectro discreto no periódico.

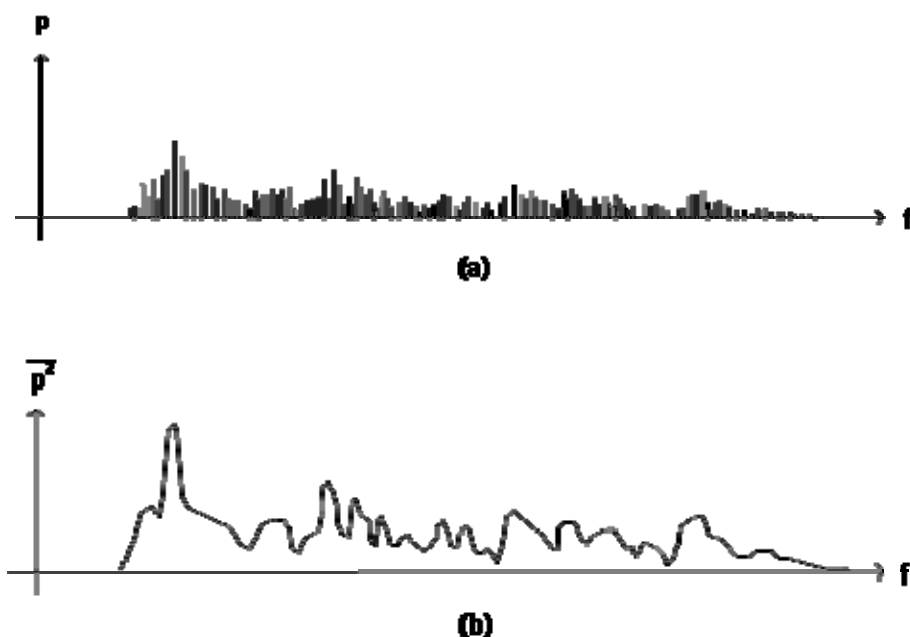


Figura 1.8. Ejemplo de espectro continuo. En (a) se muestran las líneas espectrales. En (b), la correspondiente densidad espectral.

Hay dos casos importantes para algunas determinaciones acústicas: el **ruido blanco** y el **ruido rosa**. El ruido blanco (figura 1.9 a) tiene un espectro constante con la frecuencia (su nombre proviene de la analogía con la luz blanca, que contiene todos los colores con igual intensidad). En el ruido rosa (figura 1.9 b), la energía es proporcional a $1/f$, es decir que hay mayor contenido de bajas frecuencias (el nombre se inspira en la luz rosa, que contiene todos los colores, pero el rojo con mayor intensidad). Este tipo de ruido se utiliza como señal de prueba para ensayos acústicos, ya que sirve como patrón y permite comparar mediciones en distintos puntos y ambientes.

El último tipo de espectro es el **espectro mixto**, que es la superposición de un sonido de espectro continuo y uno o más de espectro discreto (figura 1.10). La gran mayoría de los sonidos que percibimos son de espectro mixto. A un ruido de fondo de espectro continuo, se añaden sonidos de voces humanas, instrumentos musicales, motores, máquinas rotativas, etc., que contienen líneas espectrales definidas.

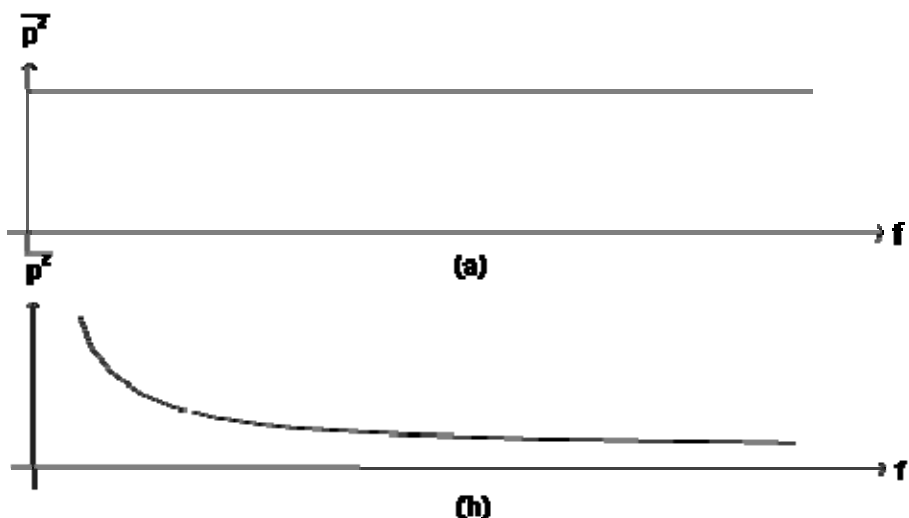


Figura 1.9. (a) Espectro de un ruido blanco. (b) Espectro de un ruido rosa.

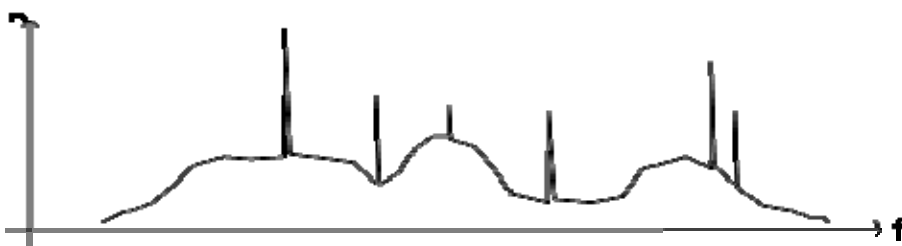


Figura 1.10. Ejemplo de espectro mixto.

2.1.12 Fuentes sonoras

Existen innumerables tipos de fuentes de ruido, cada una con particularidades que le son propias en cuanto a espectro emitido, potencia, direccionalidad, etc. En su forma más general, el problema es extraordinariamente complejo, debido a que involucra la resolución de ecuaciones ya bastante complicadas, con condiciones adicionales más complicadas aún. Hoy es posible atacar el problema por la vía de la simulación digital en ordenador, aunque los programas son muy caros y el éxito en la predicción del comportamiento de una fuente queda en última instancia supeditado a una descripción rigurosamente detallada de sus características mecánicas y acústicas.

A los efectos de un análisis simplificado, es posible y conveniente trabajar con algunos modelos menos exactos pero más manejables. De esta forma se pueden obtener resultados por lo general bastante precisos, considerando la relativa incertidumbre de los datos de que dispone habitualmente el ingeniero acústico.

La fuente sonora más simple es la **fente esférica**. El campo acústico generado por este tipo de fuente es, para cada tiempo t , constante sobre superficies esféricas concéntricas, es decir que comparten un mismo centro, denominado **centro acústico** o simplemente **centro** de la fuente. En el caso en que la variación temporal sea senoidal, interesa conocer cómo varía su amplitud, o mejor aún



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

su valor eficaz, con la distancia al centro de la fuente. Llamando $P(r)$ a la amplitud de la presión a la distancia r del centro, resulta

$$P(r) = \frac{r_0}{r} P(r_0) ,$$

donde r_0 es una distancia cualquiera y $P(r_0)$ la amplitud a dicha distancia (figura 1.11). Esta ecuación indica que *la amplitud de la presión varía inversamente con la distancia al centro*. Esta relación es válida también para la presión eficaz:

$$P_{ef}(r) = \frac{r_0}{r} P_{ef}(r_0) .$$

De esta expresión puede deducirse que el nivel de presión sonora disminuye **6 dB** cada vez que se duplica la distancia:

$$NPS(2r) = NPS(r) - 6 \text{ dB} .$$

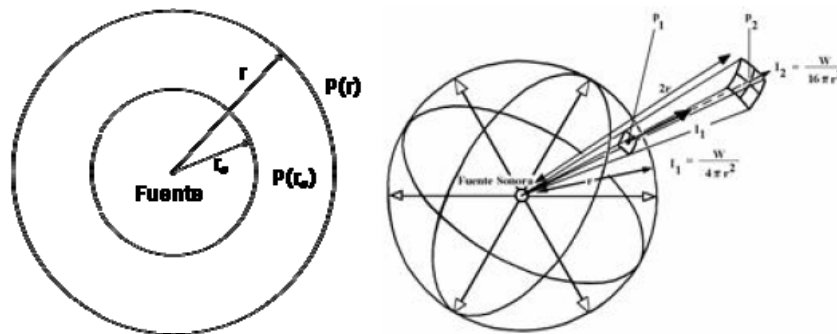


Figura 1.11. Una fuente esférica para la cual se muestran dos esferas de presión constante $P(r_0)$ y $P(r)$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

A partir de la expresión de la intensidad sonora, se obtiene el importante y conocido resultado de que la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia:

$$I(r) = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 I(r_0) .$$

NOTA: Este resultado es válido únicamente para fuentes esféricas puras. No es válido para ondas planas, ni tampoco para fuentes esféricas dentro de recintos con superficies reflectoras.

Cuando una fuente esférica es de tamaño despreciable frente a la longitud de onda que está emitiendo, se dice que es una **fente puntual**. La intensidad en las cercanías de una fuente puntual es muy alta. Por esta razón, no existen en la práctica fuentes reales que se aproximen a fuentes puntuales, aunque éstas resultan un buen modelo si las distancias no son demasiado pequeñas.

TABLA RESUMEN DE MAGNITUDES PARA EL SONIDO

Magnitudes Físicas

Intensidad Acústica W / m^2

$$I = \frac{P_{ef}^2}{\rho \cdot c} \quad \text{Campo Abierto}$$

$$I = \frac{P_{ef}^2}{4\rho \cdot c} \quad \text{Campo Reverberado}$$

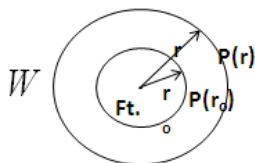
$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad \text{Ondas Esféricas}$$

Presión Eficaz (Valor cuadrático medio)

$$P_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \quad N / m^2$$

Potencia Acústica

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T p S u(t) dt$$



Medida Objetiva

Nivel de Intensidad Sonora

$$NIS = L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} (dB)$$

$$I_0 = 10^{-12} W / m^2$$

Nivel de Presión Sonora

$$L_I = 10 \log \frac{I_1}{I_0} = 10 \log \frac{P_1^2 / (\rho \cdot c)}{P_0^2 / (\rho \cdot c)} = 10 \log \left[\frac{P_1}{P_0} \right]^2 = L_p \quad P_0 = 2 \cdot 10^{-5} N / m^2$$

Nivel de Potencia Sonora

$$NWS = L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} (dB)$$

$$W_0 = 10^{-12} W$$



Suma de Niveles

$$L_{PT} = 10 \log \sum 10^{\frac{L_i}{10}} (dB)$$

Medidas de Niveles

$$\overline{L_p} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{pi}}{10}} (dB)$$

Suma de varios Niveles idénticos

$$L_p = 10 \log \left[N \cdot 10^{\frac{L_i}{10}} \right] = L_p + 10 \log N$$

Diferencia de dos Niveles (ej. Ruido fondo)

$$I_2 = I_T - I_1 \quad P_2^2 = P_T^2 - P_1^2$$

$$L_p = 10 \log \left[\frac{P_2^2}{P_0^2} \right] = 10 \log \left[\frac{P_T^2}{P_0^2} - \frac{P_1^2}{P_0^2} \right]$$

Ejemplo 1

Una fuente puntual, cuya potencia es $4\pi 10^{-2} W$

$$L_w = 10 \log \frac{4\pi 10^{-2}}{10^{-12}} dB = 110,9 dB$$

Relación entre nivel de potencia sonora y el nivel de presión sonora para fuente puntual

$$L_p = L_w - 10 \log 4\pi r^2 dB =$$

$$= L_w - 20 \log r - 11 dB$$

3. REPASO ACÚSTICA FISIOLÓGICA

3.1 Conceptos fundamentales

3.1.1 Audición

El oído percibe las variaciones de presión en forma de sonido cuando su periodicidad está entre las 16 y 16.000 variaciones por segundo (de 20 a 20.000 según otras teorías); es decir, cuando su frecuencia está entre 16 y 16.000 Hz (o 20 a 20.000 Hz).

Esta banda de frecuencias audibles se descompone generalmente en tres regiones: frecuencias graves, medias y agudas.

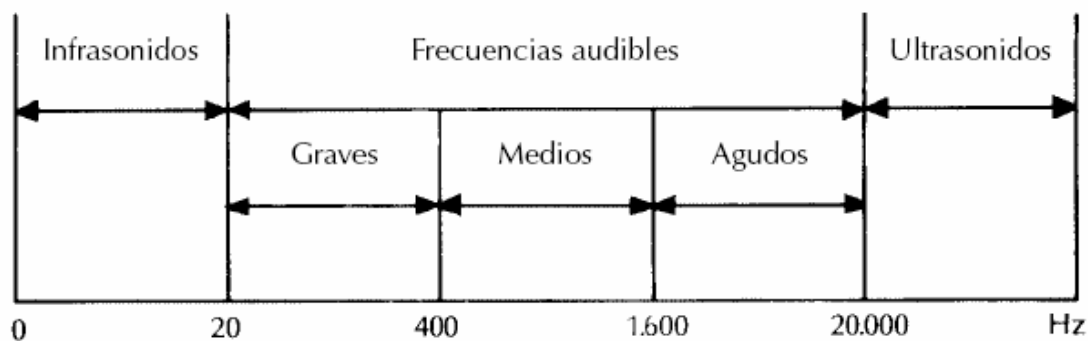




Figura 1.12. Bandas de frecuencias.

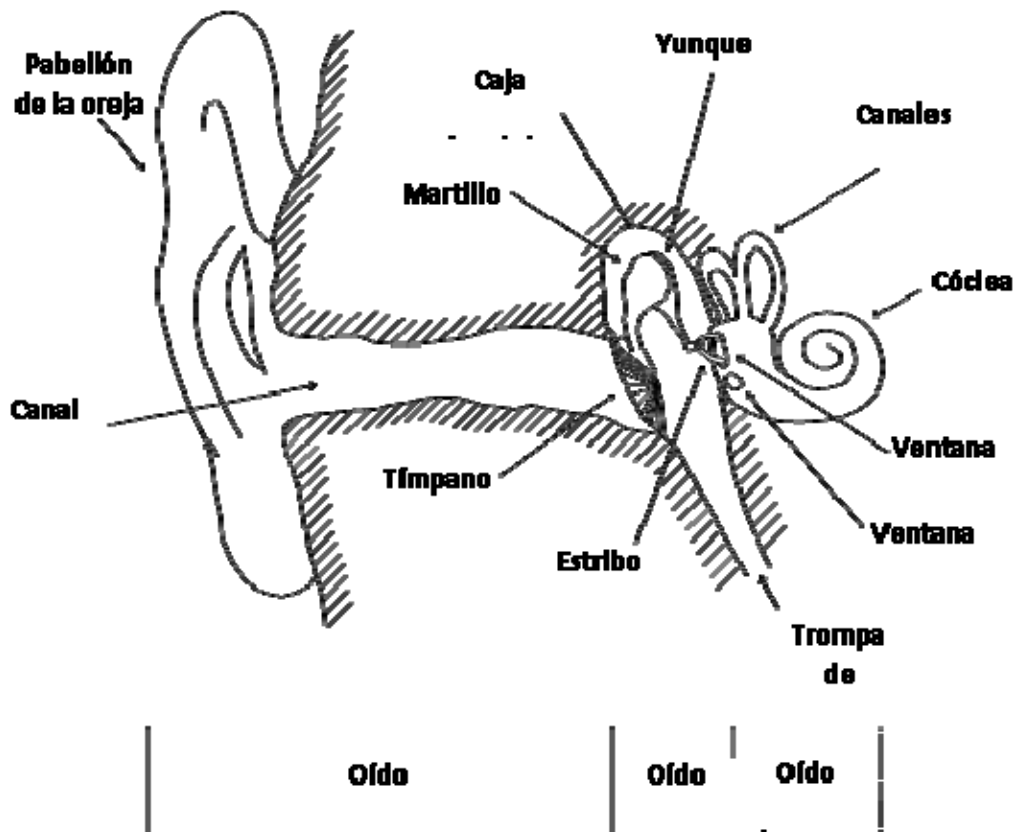


Figura 1.13. Corte transversal del oído derecho, en el cual se muestran las partes anatómicas más representativas del aparato auditivo.

El modo en que el oído percibe el sonido, es el siguiente (fig. 1.13):

- El oído externo, que fundamentalmente tiene una misión de conducción, pero escasa de percepción.
- El oído medio, que arranca en la membrana del tímpano, que es la que recoge las variaciones de presión. Estas son transmitidas por un sistema de huesecillos (martillo, yunque y estribo), que actúan como una sucesión de palancas y que constituyen un amplificador (de 55 a 60 veces).
- El oído interno, con apariencia de caracol, está relleno de un líquido (líquido linfático), que es el que transmite finalmente las variaciones de presión al auténtico órgano receptor que es la membrana basal.



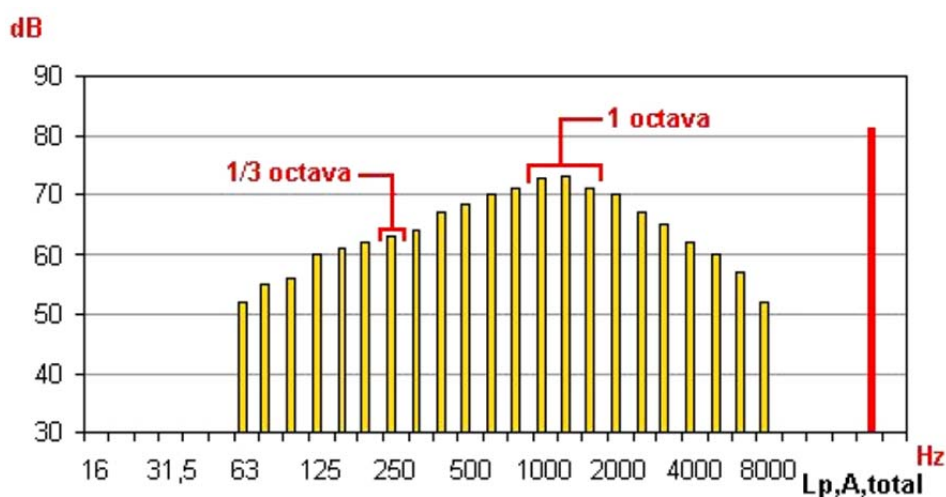
En la membrana basal están las células nerviosas (unas 25.000), son de distinta longitud (similitud con las cuerdas del piano), y según las zonas, recogen los distintos tonos.

También y debido al gran número de células, se hace un análisis de la intensidad, aunque el análisis más fino se realiza, ya, en el cerebro, al que llega esta señal mediante el nervio acústico.

3.1.2 Bandas de frecuencias

Los ruidos se suelen formar por múltiples componentes de diferentes frecuencias con distintos niveles de energía, lo que da lugar a su espectro sonoro, como hemos visto anteriormente. Además, el comportamiento acústico de materiales y elementos constructivos depende de la frecuencia.

Esto conlleva necesario un análisis en frecuencia. Para ello, se utilizan en acústica filtros con anchos de banda normalizados de frecuencia: los filtros de 1 octava y los de 1/3 de octava. Posteriormente, se puede caracterizar un ruido, un aislamiento, etc, mediante un único valor, su nivel global en dB. En la gráfica siguiente se muestra un espectro de sonido por bandas.



En acústica en la edificación las bandas de frecuencias que se suelen utilizar aparecen en la tabla siguiente:



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Octava (Hz)	1/3 Octava (Hz)
125	88 - 176
250	200 250 315
500	400 500 630
1000	710 - 1420
2000	1600 2000 2500
4000	3150 4000 5000
8000	6300 8000 10000

3.1.3 Intensidad

Las dos sensaciones fundamentales que nos da el oído, como hemos visto, son el **tono** y la **intensidad**.

El **tono** se puede determinar fácil y objetivamente midiendo la frecuencia.

La **intensidad** es una magnitud, en parte, subjetiva. Está relacionada con la presión sonora, que es objetivamente medible; sin embargo, dos sonidos de igual presión sonora y de distinta frecuencia no producen la misma sensación de intensidad. Se define como la energía por unidad de superficie y se mide en W/m^2 .

Para que el oído comience a percibir un sonido, la presión acústica debe ser, al menos, de $2 \cdot 10^{-4}$ μbar . Esto es lo que se denomina **Umbral Auditivo**.

Cuando la presión acústica supera los 10^3 μbar , el oído puede sufrir lesiones irreversibles. Esto es lo que se denomina **Umbral Doloroso**.

En la escala de intensidades, el umbral auditivo es 10^{-12} W/m^2 y el umbral doloroso es 25 W/m^2 .

Para ver cómo percibe nuestro oído, nos remitimos a la ley de Weber-Fechner: «Nuestras impresiones sonoras varían según una progresión aritmética, cuando las excitaciones físicas que las causan varían según una progresión geométrica». Es decir, que si la excitación varía de 10 a 100, nuestra impresión sonora varía de 1 a 2.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Para simplificar los cálculos y por lo dicho en el párrafo anterior, se recurre a un proceso matemático donde representamos las medidas acústicas en escala logarítmica.

La forma de establecer la medida del nivel sonoro producido por una presión acústica P , se realiza mediante la fórmula:

$$L = 20 \log \frac{P}{P_0} \text{ dB}$$

Siendo: $P_0 = 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$, presión acústica del umbral auditivo
 L = Nivel sonoro en dB

Se observa que la unidad dB es adimensional, y no tiene sentido físico.

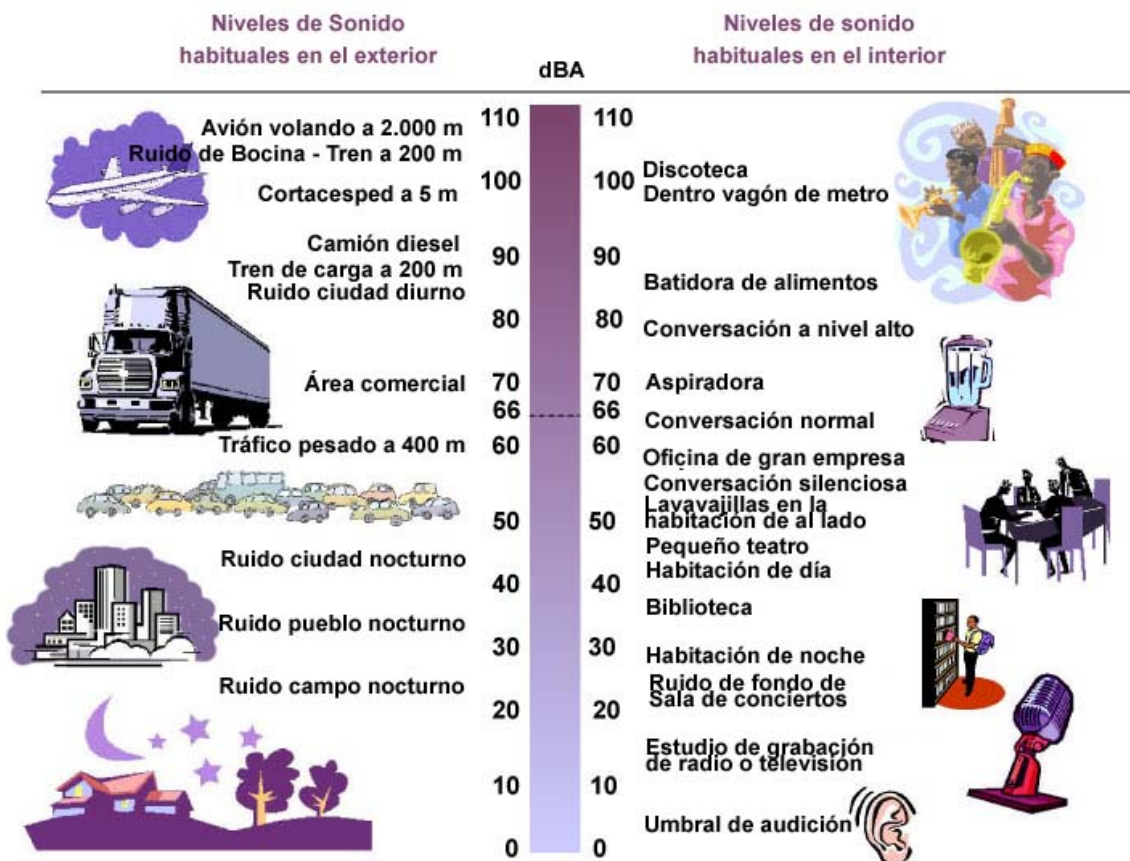
Por otra parte, como las intensidades sonoras son proporcionales al cuadrado de las presiones, la fórmula anterior puede escribirse:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}$$

Siendo $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ la intensidad acústica del umbral auditivo.



En la siguiente tabla se muestran los niveles de sonido habituales en el ambiente exterior e interior con la que se puede observar un orden de magnitud de los niveles de ruido existentes.



3.1.4 Sonoridad

Sensibilidad auditiva

Como dijimos en el apartado anterior, el oído humano no es igual de sensible a todas las frecuencias. Fletcher y Munson estudiaron la variación de la sensibilidad del oído con la presión sonora (o, lo que es lo mismo, con el nivel acústico) y resumieron su estudio en unas curvas que dan esta variación de sensibilidad en función de la frecuencia (ver fig. 1.14).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

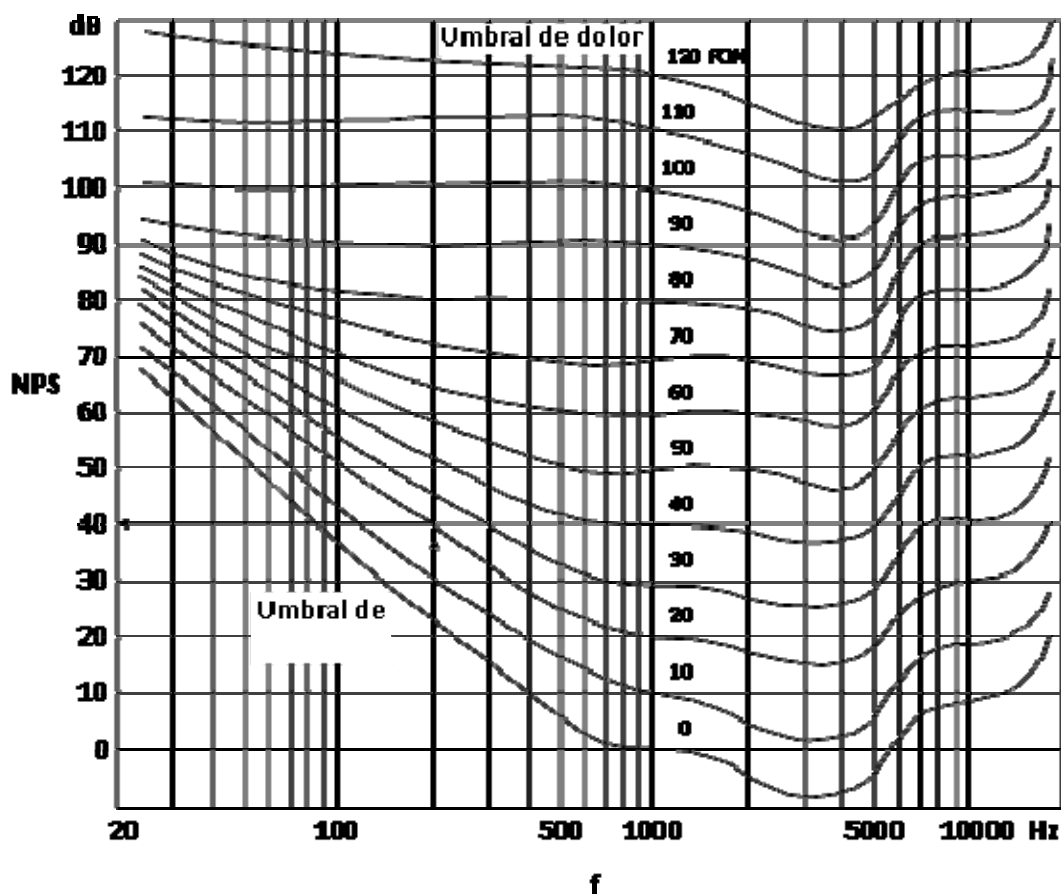


Figura 1.14. Curvas de Fletcher y Munson (1933).

Como se ve, la zona de sensibilidad máxima está situada entre para 1.000 Hz y 5.000 Hz, es algo menor para frecuencias mayores, y disminuye mucho para bajas frecuencias. Este efecto de sensibilidad depende de las personas y de la edad, la agudeza auditiva disminuye con la edad para frecuencias superiores a los 5.000 Hz.

Las curvas de igual nivel de sonoridad resuelven una parte del problema de cuantificar la sonoridad, ya que permiten determinar *cuándo dos sonidos senoidales puros son igualmente sonoros*, e indirectamente, *cuándo uno es más sonoro que el otro*. Pero no dan ninguna idea de *cuánto más sonoro es un sonido que otro*, y, por consiguiente, no proporcionan una escala absoluta para la sonoridad. Si bien la escala en **fon** es, en cierto modo, una escala de sonoridad, la misma no refleja realmente la magnitud de la sensación, ya que por ejemplo un sonido de **80 fon** no es el doble de sonoro que otro de **40 fon**.

A efectos de establecer dicha escala, se hicieron experimentos pidiendo a los sujetos que aumentaran el volumen hasta llegar a una sonoridad que duplicase la de un sonido de referencia. Otros experimentos se propusieron variar el volumen de un tono excitando un oído hasta igualar la magnitud de la sensación de sonoridad producida por otros dos tonos de referencia (iguales entre sí) excitando sendos oídos. El resultado de éstos y otros experimentos es una curva que convierte el



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

nivel de sonoridad, expresado en fon, en la magnitud psicoacústica **sonoridad**, cuya unidad es el son, como se muestra en la figura 1.15.

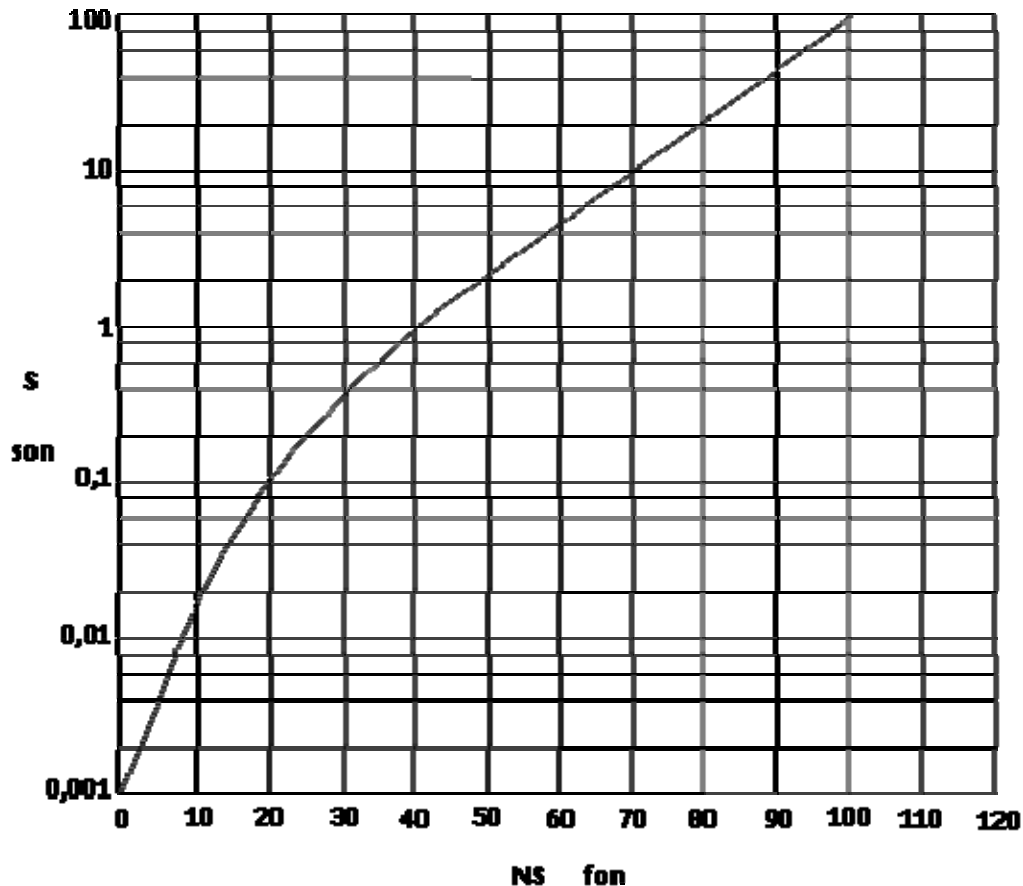


Figura 1.15. Relación entre sonoridad (son) y nivel de sonoridad (fon). La curva, dibujada en un diagrama semilogarítmico es aproximadamente lineal por encima de los 40 fon.

Se observa que para niveles de sonoridad superiores a los 40 fon, dado que el eje de ordenadas (donde se representa la sonoridad) es logarítmico, resulta que el logaritmo de la sonoridad es lineal con el nivel de sonoridad. Con mayor precisión,

$$\log_{10} S - \log_{10} 1 = K (NS - 40 \text{ fon}) ,$$

de donde



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

$$S = 10^{K(NS - 40)}$$

Reemplazando $S = 100$ para $NS = 100$ fon, resulta que $K = 1/30$, y entonces

$$S = 10^{\frac{NS - 40}{30}}$$

donde NS es el nivel sonoro en **fon**, expresándose la sonoridad en **son**.

Para el caso en que el tono es de **1 kHz**, el nivel sonoro NS coincide con el nivel de presión sonora, y entonces podemos escribir

$$S = 10^{\frac{20 \log_{10} \frac{P_{ef}}{P_{ref}} - 40}{30}} = 0,0464 \left(\frac{P_{ef}}{P_{ref}} \right)^{2/3}$$

Esto muestra que **no** es cierto que “la respuesta del oído a la intensidad es logarítmica”, como se suele decir para justificar la introducción de la escala logarítmica en **dB** para la presión sonora. Si bien la ecuación anterior vale sólo para **1 kHz**, para otras frecuencias las conclusiones son conceptualmente similares, es decir que la sonoridad aumenta aproximadamente con una potencia de la presión.

Hasta ahora hemos tenido en cuenta solamente tonos puros, pero en general los sonidos reales están compuestos por múltiples tonos puros, o peor aún, poseen un espectro continuo. Podemos resolver esta cuestión teniendo en cuenta una característica de la audición que es la de que el espectro de las audiofrecuencias queda subdividido en una serie de **bandas críticas**, es decir bandas de frecuencia relativamente angostas (del orden de **1/3** de octava, es decir una relación de $2^{1/3}$) con las siguientes propiedades:

- 1) Si dos sonidos se encuentran en una misma banda crítica, sus *intensidades* se suman (o lo que es lo mismo, sus presiones eficaces al cuadrado).
- 2) Si dos sonidos están en diferentes bandas críticas, se suman sus *sonoridades*.

Estas propiedades permiten encontrar, si se conoce detalladamente el espectro de un sonido, la sonoridad total. **Resumiendo el proceso para estudiar la sonoridad de sonidos complejos:**

- 1) *Se procede a la descomposición o análisis espectral en frecuencias simples, centradas en las denominadas bandas críticas. La gama de audio desde 20 Hz a 15.500 se descompone en las 24 bandas críticas, y en cada una de ellas se mide el nivel de intensidad que se convierte en fonios a través de las gráficas de la Fig 1.14.*
- 2) *Con la gráfica de la Fig 1.15, se obtienen los correspondientes sonios, que sumados dan la sonoridad del sonido complejo. A este método se le denomina método de Barkhausen. Si para el análisis espectral se utiliza un ancho de banda superior al crítico, se deben corregir los niveles para tener en cuenta la utilización de un ancho de banda diferente.*

No existe ningún aparato de medida que sea capaz de realizar medidas de sonoridad en lectura directa. Existen aparatos que miden con gran precisión niveles de intensidad, pero sólo con alguna aproximación de sonoridad. Los aparatos para medir sonoridades deberían tener una variación de la sensibilidad en función de la frecuencia y la amplitud similar a la del oído humano.



Así, los sonómetros tienen unos filtros de ponderación para acomodarse a la sensibilidad del oído, Fig 1.16 dB(A).

3.1.5 Efecto de enmascaramiento

La sensibilidad del oído humano que hemos visto para tonos puros no es igual en el caso de sonidos y ruidos compuestos de varios tonos. Esto es lo que se conoce como «efecto de enmascaramiento».

Este fenómeno tiene mucha importancia en la vida cotidiana, y su efecto puede ser ventajoso o perturbador. Por ejemplo, a veces en una casa no se oyen los ruidos de la conversación o de la radio de los vecinos, y no es debido a que los muros o forjados reduzcan tanto los ruidos como para que queden por debajo del umbral auditivo; sino que existe un ruido «enmascarante» que puede ser un ruido de tráfico o de alguna actividad desplegada en la casa; cuando estos «ruidos de fondo» desaparecen, por ejemplo por la noche, se perciben los ruidos perturbadores que antes eran inaudibles.

3.1.6 Molestia

El ruido, por sus efectos fisiológicos, puede ser una fuente de molestia. La aparición repentina de un ruido inhabitual lleva consigo una modificación de la actividad fisiológica: crecimiento del ritmo cardíaco, modificación del ritmo respiratorio, variación de la presión arterial, ...

Desgraciadamente, la perturbación de un ruido que se debe considerar como molesto no está influenciada solamente por las leyes fisiológicas de la sensibilidad sonora, sino también por la disposición psicológica, subjetiva y muy variable con el tiempo de cada observador en particular.

Intentamos definir el concepto de ruido:

Para mucha gente, el ruido no es ni más ni menos que el sonido que producen los demás. Una definición más técnica puede ser: «El ruido es una señal acústica que no muestra claramente ningún tono definido», o «El ruido es una variación de la presión acústica que puede ir acompañada o no de algunos sonidos más o menos musicales».

La molestia objetiva y subjetiva

El concepto de molestia, al que se empareja «in mente» el concepto de ruido, al igual que la intensidad, es un concepto indefinido. Se puede descomponer en una parte estadística, y por ello medible (molestia objetiva); y una segunda parte que no se puede someter básicamente a ninguna medida (molestia subjetiva).

La parte medible se apoya fundamentalmente en la impresión de que las frecuencias altas son más molestas que las bajas, como ya vimos antes.

El decibelio A

Debido a la subjetividad, es difícil obtener con un solo valor una medida del nivel acústico; es decir, un valor objetivizado que se aproxima lo más posible a la percepción del oído.

Uno de los sistemas empleados para definir con un solo valor el nivel de presión acústica es el decibelio A [dBA]. Esta medida está basada en las curvas antes vistas de Fletcher y Mounson sobre la sensibilidad del oído en función de la frecuencia. Se obtiene mediante la media ponderada entre el espectro del ruido y la curva siguiente, que se conoce como curva de ponderación A.



La medida en dBA se acepta como la valoración simple más aproximada a la sensación producida por música, palabra y ruidos comunitarios más generales, incluidos los de tráfico y electrodomésticos, y siempre que no se trate de ruidos con tonos predominantes.

Esta curva está tomada de la norma UNE 21.314, y se utiliza para compensar las diferencias de sensibilidad que el oído humano tiene para las distintas frecuencias dentro del campo auditivo.

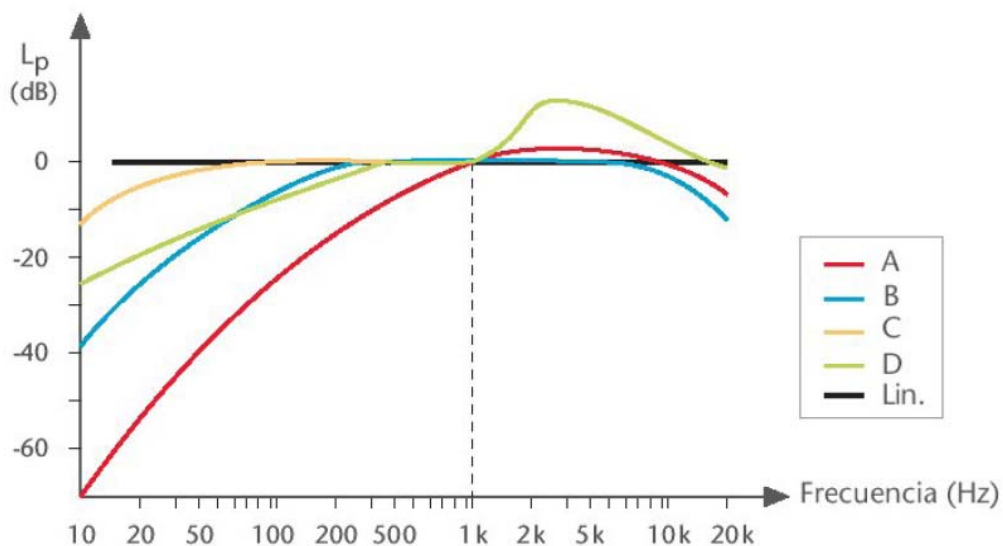


Figura 1.16. Curvas de ponderación.

Frecuencia en Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
Ponderación en dBA	-19,1	-16,1	-13,4	-10,9	-8,6	-6,6	-4,8	-3,2	-1,0	-0,8

Frecuencia en Hz	1.000	1.250	1.600	2.000	2.500	3.150	4000	5.000
Ponderación en dBA	0	0,6	1,0	1,2	1,3	1,2	1,0	0,5

TABLA 1.4. Valores de la curva de ponderación A para el margen de frecuencias usado comúnmente.

3.1.7 Vibraciones

Sensación y percepción de vibraciones

Se entiende, en general, por sensación de vibración, la sensación de excitación vibrátil que se produce por contacto directo del cuerpo humano con un cuerpo sólido que vibra.



Como no existe un órgano determinado que perciba este tipo de vibración, no es posible una separación clara entre sonido y sensación de vibración, a menos que limitemos la expresión de vibración a las vibraciones por debajo de 16 Hz (o 20 Hz); es decir, los infrasonidos que no se pueden percibir como sonido. Sin embargo, esta limitación no es razonable ni en sentido físico ni en sentido fisiológico, ya que el oído puede percibir los sonidos que alcanzan y excitan la membrana del tímpano, así como las vibraciones de los huesos del cráneo que excitan directamente al oído interno (audición por conducción ósea, audífonos). También, las células sensoriales de la piel pueden sentir las vibraciones y, en el caso de ser fuertes, pueden abarcar todo el cuerpo y extender esta sensación a los órganos internos, fundamentalmente a los pulmones y estómago, ya que las bolsas de aire que contienen dichos órganos hacen las veces de amplificador de vibraciones.



4. ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

La Acústica Arquitectónica se divide en tres partes:

- **Aislamiento Acústico:** Trata el estudio de la protección contra los ruidos y vibraciones que se deseen evitar en los recintos habitables.
- **Acondicionamiento Acústico:** Trata del estudio de intervenciones dirigidas a dosificar la intensidad de los fenómenos sonoros percibidos por los oyentes y a adaptar el local o recinto al uso al que está destinado. En otras palabras, a mejorar la calidad acústica del interior de un recinto supuestamente aislado del exterior.
- **Acústica Urbanística:** Estudia el conjunto de intervenciones dirigidas a asegurar la adecuada protección frente a ruidos exteriores de las distintas zonas urbanas.

Las vibraciones de una fuente sonora situada en un espacio ilimitado, originan perturbaciones en la atmósfera que la rodea, que en forma de variaciones de presión se propagan en todas las direcciones desde la fuente, creándose un campo alrededor de la misma, que se puede estudiar mediante las leyes que relacionan la presión sonora con el tiempo y la distancia. Si la fuente produce el sonido permanentemente, éste se hace más intenso según nos acercamos a la misma, debilitándose si nos alejamos de ella. Como no existen ondas reflejadas, las vibraciones de las partículas de aire de la onda, disminuyen en amplitud a medida que la misma se aleja de la fuente, de hecho la amplitud de la onda que llega al punto de recepción disminuye hasta la mitad, al duplicar la distancia que existe entre esta posición y la fuente. Debe tenerse en cuenta que si existe viento, el sonido será más intenso en la dirección a favor del viento, y más débil en dirección contraria.

Una de las principales dificultades que existe cuando se intenta escuchar un sonido en el exterior, es la falta de habilidad de las personas para escucharlo solamente, ya que además se perciben los sonidos producidos por el tráfico rodado y aéreo, el creado por las personas, industrias, etc, estando además de todo esto en el exterior, sometidos a los agentes atmosféricos. Para realizar alguna mejora en las condiciones de audición en el exterior, se puede poner una cubierta alrededor de la fuente. Con esta medida se producen dos beneficios en el campo sonoro, en primer lugar se crea una barrera que protege a la fuente de sonidos extraños procedentes del exterior, y en segundo lugar, esta cubierta recoge el sonido que normalmente se hubiera radiado hacia el arriba y hacia la parte posterior de la fuente, dirigiéndola hacia el punto de recepción. Por supuesto, al receptor le llegan los sonidos producidos por el tráfico rodado y aéreo, estando también sometido a los agentes atmosféricos. La protección, también proporciona dos mejoras para la fuente que se encuentra en su interior, puesto que se puede escuchar a sí misma mejor, ya que los sonidos se amplifican y se reflejan volviendo de nuevo a la fuente; y simultáneamente se mezcla el sonido de forma que cuando sale de la protección es más coherente.

Los antiguos griegos, egipcios y romanos, ya conocían este principio elemental al construir sus estadios al aire libre, haciéndolos con asientos situados a diferentes niveles hacia arriba, ofreciendo una construcción de este tipo múltiples ventajas, como puede ser, el que se eliminan los sonidos procedentes de fuentes sonoras distantes que se encuentran en la parte posterior del estadio; por otra parte, los sonidos que proceden de la parte posterior del escenario, también desaparecen levantando una pared en la parte posterior del mismo. Así mismo, existe una ganancia en intensidad, ya que los oídos de cada persona no están apantallados por la cabeza de las que se encuentran delante de ella. La intensidad sonora en el fondo del auditorio, es aproximadamente la misma que



sino hubiera público entre la fuente y la última fila. A pesar de las ventajas que tienen este tipo de espacios, sigue existiendo el problema del ruido debido al tráfico rodado y al aéreo, así como el problema de los agentes atmosféricos.

Para resolver estos inconvenientes, solo se necesita levantar unas paredes laterales y un techo por encima de la superficie que ocupan los espectadores, así mismo, si estas superficies están cubiertas con materiales que absorben totalmente el sonido, las condiciones sonoras no habrán cambiado, puesto que el sonido se radia en todas las direcciones, siendo absorbido por completo, como sucedía en el espacio libre, pero se ha eliminado el ruido, así como los agentes atmosféricos. De esta forma, se mejora la audición del sonido producido por la fuente, que se escucha tal y como lo origina la misma, sin ninguna clase de modificación sonora creada por el recinto cerrado. Un local de este tipo, que se encuentra con sus superficies interiores recubiertas con materiales que absorben toda la energía que incide sobre ellas, se llama "recinto anecoico", ya que no altera la onda sonora producida por la fuente.

Consideremos seguidamente lo que sucede cuando situamos la fuente en un recinto cuyas superficies no estén totalmente cubiertas con materiales que absorben completamente el sonido, llamándose a un recinto de estas características "recinto reverberante". La existencia de superficies límites, que rodean parcial o totalmente a la fuente, cambian el carácter del campo sonoro, ya que el volumen de aire encerrado entre esas superficies, no solo está excitado mientras la fuente está emitiendo, sino que puede continuar en este estado de vibración después de que la misma ha dejado de emitir.

La calidad de la audición, o el ambiente sonoro necesario para facilitar una escucha determinada, depende de las exigencias de uso de los recintos, por ejemplo en teatros, auditorios, estudios de grabación sonora, etc, la audición es más crítica que en cines, viviendas, oficinas, etc. Los problemas más importantes que se presentan al tratar de diseñar acústicamente los diferentes tipos de recintos, son principalmente los referidos al aislamiento y al acondicionamiento acústico.

El primer punto consiste en obtener un buen aislamiento, tanto contra el ruido aéreo como contra el ruido estructural, entre los diferentes locales, para los que es necesario tener en cuenta en el momento de diseño, las leyes fundamentales del aislamiento acústico, considerando los materiales que se emplean para construir las paredes divisorias, el espesor de las mismas, la existencia de paredes dobles, puertas, ventanas, la perforación de paredes, techo o suelo para servicios básicos, tales como potencia eléctrica, aire acondicionado, cableado de sistemas, es decir, se trata de impedir que perturbaciones sonoras pasen de un recinto a otro, bien transmitiéndose a través del aire, o por las estructuras.

El segundo punto a tener en cuenta, es el de obtener un buen acondicionamiento acústico de los recintos, para lo cual se tratará internamente las paredes, puertas, ventanas, techo y suelo, y se considerará su forma geométrica, así como sus dimensiones. También será necesario un grado de difusión sonora uniforme en todos los puntos del mismo, considerando que sus propiedades se deben a las reflexiones de las ondas en todas las superficies límites, fijándose en que el valor de sus parámetros característicos sean idóneos en cada caso, es decir, que el campo creado en el interior del recinto por una fuente sonora, origine las condiciones adecuadas de audición de acuerdo con el uso del local.

En muchos locales, el acondicionamiento térmico, y sus sistemas de climatización, son muy importantes, con el fin de que su aportación al nivel de presión sonora sea prácticamente nula. Por este mismo tema, debe cuidarse el sistema de iluminación, con el fin de que no introduzca ruido aéreo al ambiente sonoro de los recintos.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

La propiedad característica de muchos recintos para la palabra, es que cuanto se diga en ellos debe oírse clara y distintamente, y que el timbre de la voz de quienes hablan no varíe, los recintos para música, tratan de transmitir la música con gran calidad.

Los datos más característicos que deben tenerse en cuenta para obtener un buen diseño de todos los locales son:

- a) Nivel de ruido ambiental LN;
- b) Tiempo de reverberación T;
- c) Pérdidas de transmisión sonora de paredes, suelos y techos TL; etc.

4.1 Fundamentos de acondicionamiento

Como se ha dicho anteriormente el acondicionamiento acústico se utiliza para mejorar la calidad acústica de un local, dicha calidad acústica va a depender del tipo de mensaje sonoro, ya que no exige lo mismo en percepción un mensaje oral que un mensaje musical.

Todo lugar destinado a la emisión y audición de mensajes sonoros lleva implícita la existencia de una cadena de comunicación compuesta por: Emisor, Canal de Transmisión, Receptor. Lo importante en una cadena de comunicación es que el mensaje llegue con la **máxima calidad** posible al Receptor.

4.1.1 El campo sonoro en recintos

Cuando una fuente sonora emite energía, las ondas producidas se propagan radialmente en todas las direcciones a partir de ella, y cuando encuentran un obstáculo (superficies interiores), cambian su dirección, es decir, se reflejan. En la figura 1.16 se presenta el fenómeno de la reflexión de las ondas originadas por la fuente S, sobre una superficie plana. Las líneas curvas representan un tren de ondas difundiéndose en las direcciones indicadas por las flechas continuas, mientras que las discontinuas presentan el comportamiento de las ondas una vez reflejadas en la pared. Según se aprecia en esta figura, la reflexión del sonido en una pared, parece que lo hace como si procediera de la fuente imaginaria S'. Si la superficie reflectante no absorbe nada y es perfectamente rígida, no habrá pérdida de energía en cada reflexión y la onda reflejada producirá la misma presión sonora en un punto dado, que la que se originaría si la fuente imaginaria tuviese la misma potencia sonora de salida que la fuente real.

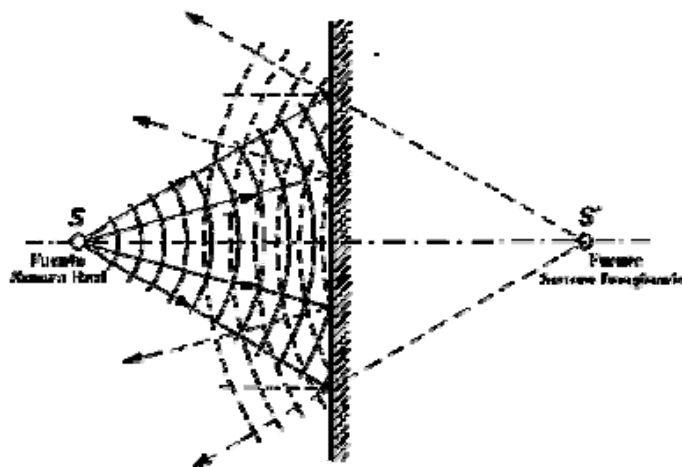


Figura 1.17. Reflexión de las ondas sonoras en una superficie plana.

No existe sin embargo, una superficie física que sea un reflector perfecto, sino que o bien se pondrá en movimiento por efecto de la onda incidente, o si tiene estructura porosa, permitirá la propagación de las ondas en el interior del material. Si sucede cualquiera de estos dos procesos, las ondas reflejadas tendrán menos energía que las ondas incidentes, diciéndose que parte de esta energía es absorbida por la superficie (figura 1.18).

El sonido producido por una fuente continua dentro de un recinto, incide sobre las superficies límites del mismo, reflejándose una parte, tendiendo estas reflexiones a aumentar el nivel de presión sonora en el recinto. Los materiales absorbentes sonoros, son aquellos que reducen el nivel de energía de las múltiples reflexiones que persisten en el tiempo en un local.

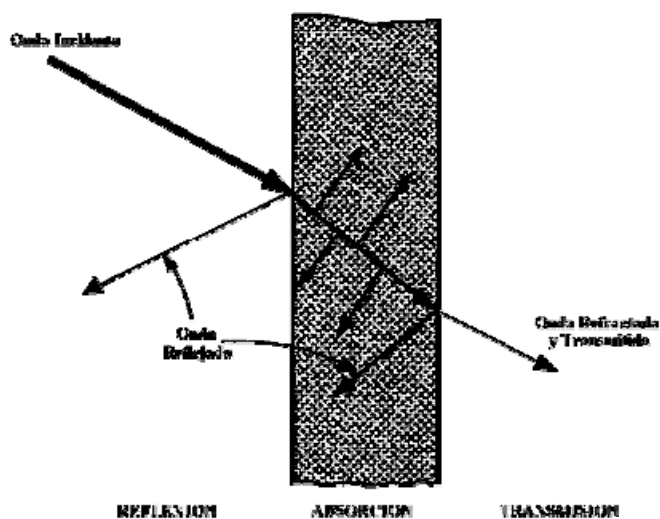


Figura 1.18. Reflexión y transmisión de ondas sonoras sobre superficies.



En un recinto con una fuente sonora puntual si sus paredes laterales, suelo y techo son parcialmente reflectantes, el campo sonoro dentro del mismo estará formado por dos partes (figura 1.18):

1. **El sonido directo D** que va desde la fuente al observador, siendo el mismo que bajo las condiciones de campo libre.
2. **Los sonidos reflejados $R_1, R_2, \dots$** , que van desde la fuente al receptor después de una o más reflexiones en las superficies.

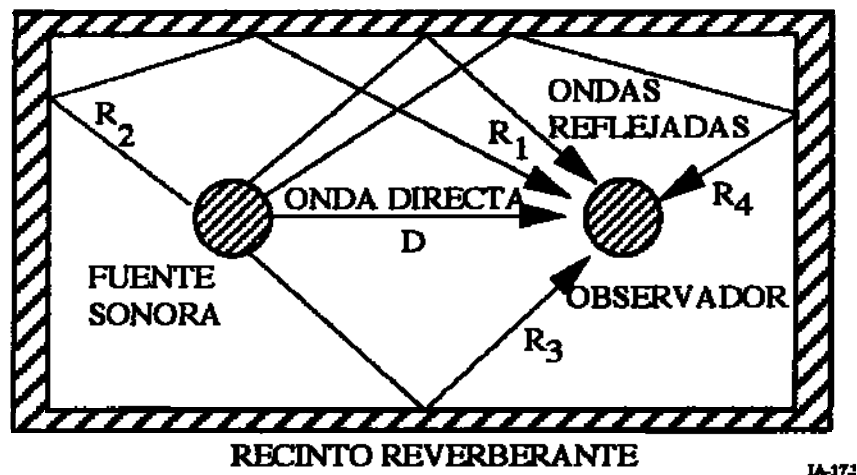


Figura 1.19. Ondas directa y reflejadas en un recinto.

De acuerdo con lo expuesto, el campo sonoro se determina a partir tanto de la potencia de la fuente, como de las propiedades reflectantes de las superficies del recinto. El estudio de las características acústicas de los recintos, no solo se puede realizar mediante consideraciones sobre el aspecto físico del proceso sonoro, sino que debe efectuarse una evaluación subjetiva de dichos procesos, con la ayuda de unos equipos especiales, que permiten tener un juicio más real. El verdadero sonido producido por una fuente sonora es el que se propaga directamente al punto de recepción, que es *el sonido directo*. Una fracción de segundo más tarde se recibe la primera reflexión procedente de las superficies laterales, al propagarse estas ondas por todo el recinto, produciendo modos normales de vibración, donde cada uno disminuye a su propia velocidad, dando lugar a la parte de *sonido reverberante*.

Desde el punto de vista de percepción auditiva, lo más interesante son las características particulares de la audición, como por ejemplo la capacidad del oído para recibir secuencias de impulsos sonoros (figura 1.20), y sumar su energía evitando que el intervalo entre los impulsos no exceda de un determinado tiempo.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

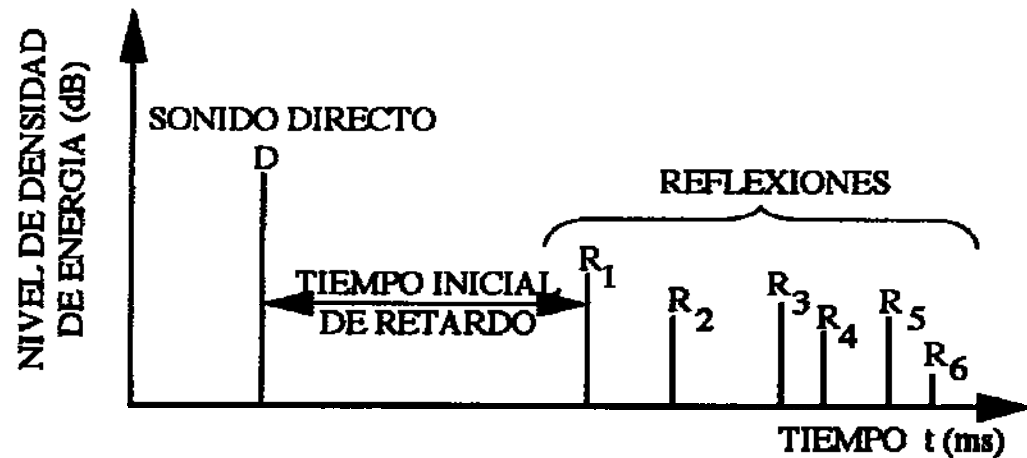


Figura 1.20. Diagrama de llegada de las ondas sonoras directa y reflejadas al observador.

En esta figura se observa cómo llega al receptor primero el sonido directo D, en el gráfico de tiempos, recibiendo posteriormente en el tiempo las reflexiones R_1 , R_2 , ... Como se ve en este diagrama, el sonido directo llega antes de todas las reflexiones, ya que viaja por el camino más corto, después llega la primera reflexión, inmediatamente después la segunda, tercera y demás reflexiones. Si la separación en tiempo entre la llegada de la señal directa y la primera reflexión supera un cierto tiempo, aparecerá el fenómeno del eco, ya que el oído no es capaz de sumar las dos señales, sino que las diferencia, lo que supone un fallo de diseño acústico.

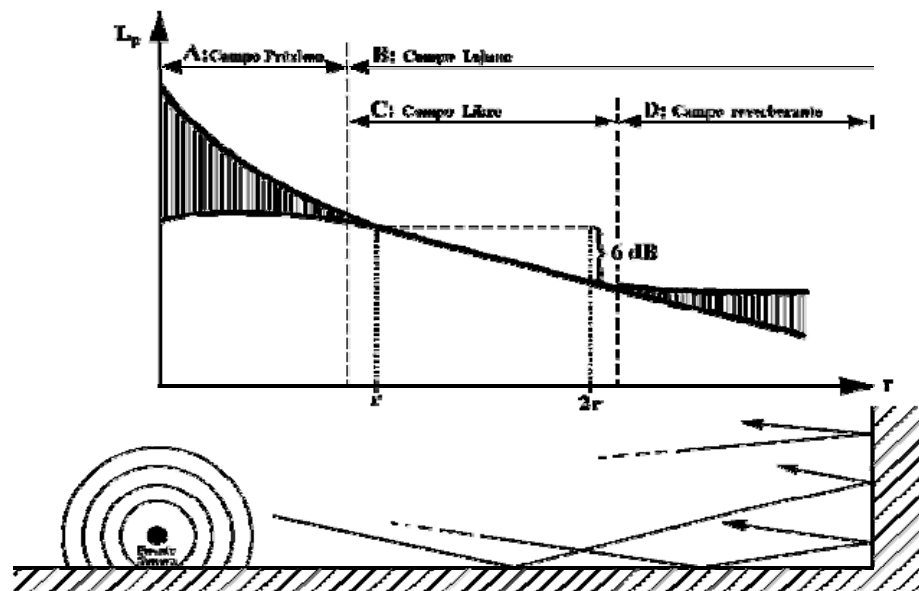


Figura 1.21. Descripción del campo sonoro que rodea a una fuente en un recinto reverberante.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

La naturaleza del campo sonoro que rodea a una fuente en un recinto (figura 1.20), está formado por el *campo sonoro directo o libre* y por el *campo sonoro reverberante*. La inmediata vecindad a la fuente se conoce como *campo próximo*. La dimensión de este campo es difícil de definir, ya que depende de muchos factores, tales como la frecuencia, dimensiones de la fuente y fases de las superficies radiantes. En la región conocida como *campo lejano*, el nivel de presión sonora disminuye 6 dB cada vez que la distancia entre la fuente y el punto de observación se duplica, actuando como en el espacio libre. Si la fuente sonora radia en un recinto reverberante, se crea un *campo reverberante*, que se superpone al campo lejano creado por la fuente, y que puede hacer desaparecer totalmente al mismo, si el recinto es muy reverberante. El campo reverberante se denomina *campo difuso*, si se cumplen las siguientes proposiciones:

1. Las ondas reflejadas llegan a todos los puntos en el interior del recinto desde diferentes direcciones, siendo todas ellas igualmente probables.
2. La energía sonora en un punto del espacio, se obtiene sumando aritméticamente los valores medios de las energías de todas las reflexiones que pasan a través de dicho punto.
3. La densidad de energía en un instante de tiempo es la misma en cualquier punto del recinto.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, la calidad sonora de un recinto está determinada en parte por la capacidad de absorción de los materiales que recubren sus superficies límites. Esta capacidad de absorción se debe a las pérdidas de energía en la superficie o en el espesor del material, dependiendo de su estructura, densidad, elasticidad y otras propiedades físicas.

El estudio del acondicionamiento Acústico se divide en **tres partes**:

- **Acústica Geométrica:** Trata de estudiar la distribución del campo acústico mediante **trazado de rayos**. Se supone que de la fuente emergen un número finito de rayos sonoros, que siguen la dirección de propagación de las ondas sonoras. El estudio geométrico, por trazados de rayos, es imprescindible en todo proceso de acondicionamiento, para tener una idea de la forma o geometría más adecuada, estudiar la posibilidad de existencia de ecos, prever posibles zonas de focalización.
- **Acústica Estadística:** A medida que se propaga el sonido en una sala, se van produciendo sucesivas reflexiones, y los ángulos sólidos que abarca cada rayo van siendo mayores, llegando, después de algunas reflexiones, a abarcar la sala en su totalidad. A partir de este momento, ya no es adecuado un estudio geométrico. En este proceso de reflexiones sucesivas, se va perdiendo energía acústica, llegándose a alcanzar un **régimen estacionario de energía** en la sala, cuando los cerramientos y objetos presentes absorben la misma energía media se estabiliza la sala. Cuando la fuente deja de emitir, la energía presente no desaparece de inmediato, se requiere un cierto tiempo para que la energía acumulada se absorba hasta llegar a ser inaudible. Para estudiar estas condiciones es necesario evaluar **estadísticamente la energía acústica** en su conjunto. El estudio de estas teorías se basa en lo que llamamos Acústica Estadística.



- **Acústica Ondulatoria:** Se basa en la resolución de la ecuación diferencial de la onda acústica en cada sala introduciendo sus condiciones específicas de contorno. Tiene en cuenta **el comportamiento físico real de tipo ondulatorio** del sonido. La solución de la ecuación diferencial demuestra que cada región del espacio de una sala representa un sistema capaz de vibrar en sus tres dimensiones.

4.2 Fundamentos de Aislamiento

Los sonidos se pueden clasificar también por su respuesta subjetiva, así los más usuales, como por ejemplo la palabra, pueden considerarse como sonidos, siempre que los niveles de presión sonora que producen no sean excesivos, ya que en este caso se tendrían que denominar **ruidos**, entendiendo por tal, *todo sonido no deseado*. Ciertos sonidos agradables se clasifican generalmente como musicales, aunque pueden convertirse en ruido, de acuerdo con la definición anterior. *Por tanto, vemos que la diferencia entre sonido agradable y sonido molesto, depende tanto del nivel de presión sonora, como de la respuesta subjetiva*. El grado de molestia de un ruido depende principalmente de su nivel de presión sonora, siendo la respuesta subjetiva, dependiente de la naturaleza del sonido.

En cualquier lugar, existe ruido procedente de diferentes fuentes, unas próximas y otras lejanas, puede venir reflejado por las superficies, e incluso una parte de él, puede proceder de todas las direcciones. De acuerdo con lo expuesto, el ruido total asociado con un determinado entorno, se llama "*ruido ambiental*".

El ruido se puede clasificar de diferentes formas, una por ejemplo en función del nivel de presión sonora:

- a) de elevado nivel de intensidad (nivel de ruido >90 dB), produce dolor y pérdida de audición, debiendo de eliminarse;
- b) de nivel de intensidad intermedia (60 dB $<$ nivel de ruido < 90 dB), estos ruidos se pueden soportar, aunque son molestos;
- c) de pequeño nivel de intensidad (nivel de ruido < 60 dB), no producen trastornos físicos, aunque si pueden ser psicológicos.

El cero absoluto no se obtendrá nunca, y además se debe de evitar, puesto que afecta al sistema nervioso humano. Los ruidos *se producen en unos focos sonoros o fuentes* (calle, televisor, discoteca, etc), *se transmiten a través de un medio* (cuerpos sólidos, líquidos, aire), y por último *llegan al receptor* (un individuo, una comunidad, etc). Se puede decir, que cuando la salida de un foco sonoro se ve influenciada por el medio o el receptor, la impedancia de radiación del foco, ha sido alterada por su entorno, de forma análoga la reacción del receptor depende de las características del medio y de la fuente.

Para controlar la transmisión de sonido (o ruido) a un local objeto de aislamiento acústico hay que tener en cuenta que el mecanismo de transmisión está formado por: fuente de ruido, canal de transmisión y local receptor.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

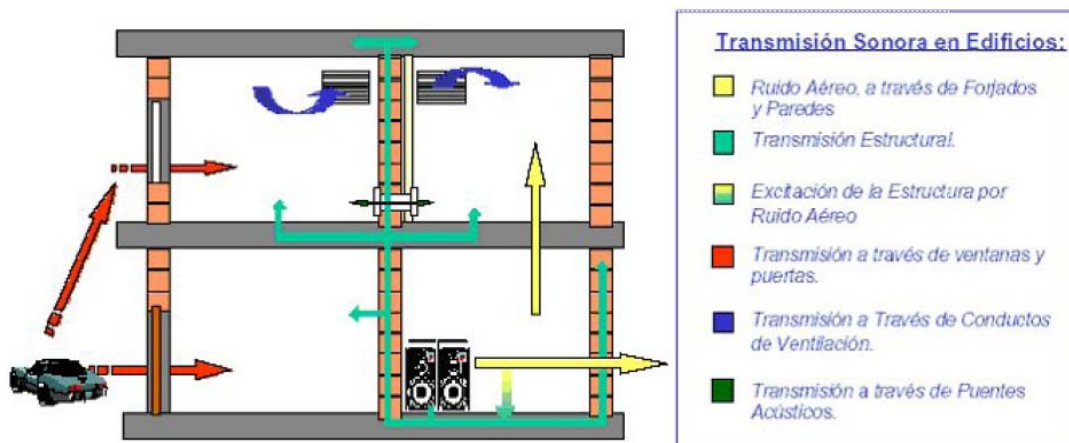
Acústica Arquitectónica

La **fente** se caracteriza por su localización, así como por la naturaleza y descripción del sonido que produce (tipo de fuente, intensidad sonora, espectro de frecuencias, variación temporal...)

El **canal de transmisión** está constituido por todos los elementos a través de los cuales llega el sonido desde la fuente al receptor. Estos elementos son:

- paredes (medianeras, fachadas, tabiques interiores...)
- forjados (suelos, techos, cubiertas)
- elementos estructurales (vigas, pilares, cimentaciones...)
- otros espacios (patios, escaleras, huecos ascensor, falsos techos, locales contiguos)
- puertas, ventanas...

VIAS DE TRANSMISIÓN DEL SONIDO: DIRECTA E INDIRECTAS.



El **tramo final del canal de transmisión** está constituido por los elementos constructivos que delimitan el local receptor y es la vibración de estos elementos la que produce las ondas sonoras en el mismo.

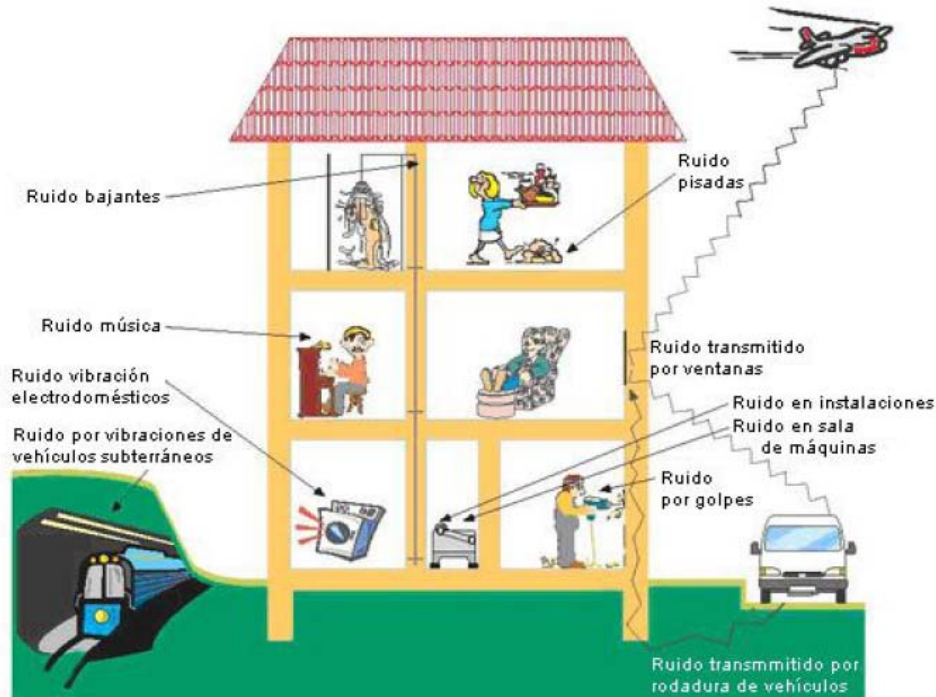
Según la forma de producirse y propagarse, el ruido puede ser:

- **AÉREO:** llega a los cerramientos del local receptor por el aire circundante y hace que entre en vibración, con independencia de la forma de producirse.
- **DE IMPACTO:** se produce un golpe de corta duración sobre los cerramientos del local receptor y los hace entrar en vibración.
- **DE VIBRACIÓN:** la vibración de otros elementos (máquinas, motores...) es transmitida a los cerramientos del local receptor.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica



El conocimiento exhaustivo, tanto de las fuentes de ruido como de sus posibles vías de comunicación con el local receptor, nos permitirá dar a éste el adecuado nivel de aislamiento para proteger a sus ocupantes del ruido producido por dichas fuentes.

Para el control acústico del ruido se puede actuar sobre:

- Fuentes del ruido
- Local o espacio donde se produce el ruido (inicio del canal de transmisión)
- Posibles vías de transmisión del ruido al local receptor (canal de transmisión)
- Local receptor (final del canal de transmisión)
- Personas o elementos receptores

El estudio de los mecanismos de transmisión de los ruidos, ya sean aéreos o de vibración o impacto, nos permitirá sacar conclusiones respecto a las barreras a utilizar para evitar parte de dicha transmisión, o lo que es equivalente, la naturaleza del mecanismo de aislamiento a utilizar.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

4.3 Fuentes de ruido

El grado de contaminación ambiental en los grandes centros de población debido al ruido, tiene cada día más trascendencia, por lo que se trata de estudiar y conocer con profundidad las fuentes sonoras y sus características físicas, para disminuir los niveles de ruido que generan, y proteger a las personas de esta lacra de las modernas sociedades, que produce grandes problemas sociales, económicos, psicológicos, etc.

Seguidamente pasamos a mencionar algunas de las fuentes de ruido más importantes, que dividimos en dos grandes grupos:

- 1) fuentes de ruido externas a los edificios,
- 2) fuentes de ruido internas a los edificios.

El conocimiento de estas fuentes nos permitirá saber como se producen los ruidos, y como se propagan, tratando por último de establecer una relación entre las magnitudes físicas de las fuentes sonoras y el grado de molestia que originan.

Los valores objetivos de las fuentes sonoras, que se pueden medir son:

- Nivel de potencia sonora:
- Nivel de intensidad sonora:
- Nivel de presión sonora:

Por tanto, el conocimiento de estas fuentes de ruido, nos permitirá conseguir que los recintos tengan el ambiente acústico adecuado, que permita que los trabajos que se hagan en los mismos, sean los correctos.

4.3.1 Fuentes de ruido externas a la edificación

Para realizar el estudio y el control de los ruidos externos a los edificios, enumeremos seguidamente las diferentes fuentes, empezando por la más importante.

Para tener una idea aproximada de las intensidades del ruido, consideremos los siguientes ejemplos, en un recinto tranquilo el nivel es de 30 o 40 dB; en una calle en un momento de intenso tráfico sería de 70 a 90 dB, y el ruido producido por un martillo neumático sería de 130 dB, estos ejemplos se ven en la figura 1.21.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

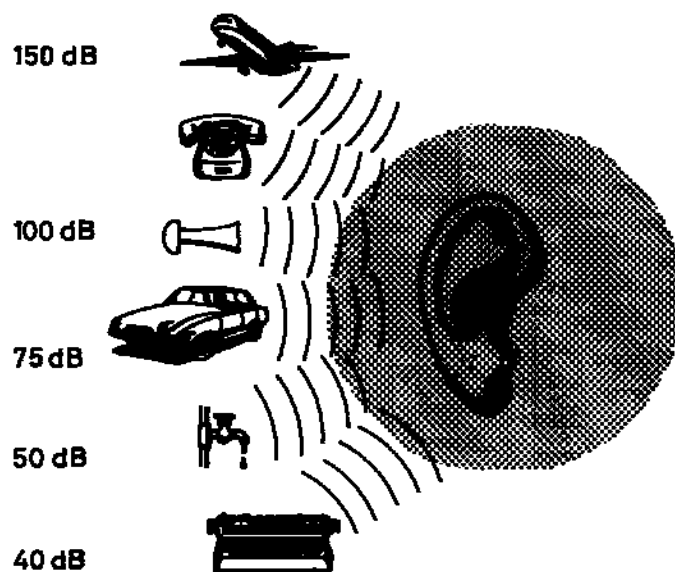


Figura 1.22. Ejemplos de diferentes tipos de ruidos y sus niveles.

1) **"Ruido debido al tráfico rodado"**: De las diferentes fuentes de ruido la más importante, es la del tráfico rodado, producido por vehículos en movimiento, por medio de su motor, órganos de transmisión, chapa, neumáticos, etc. Una idea de los niveles que se alcanzan, es que la legislación existente en los diferentes países marca unos niveles máximos que no deben superarse, que van desde los 80 a los 90 dB (A) para coches y de 70 a 80 dB (A) para motocicletas.

Los niveles anteriores no son producidos por un sólo vehículo, sino por muchos coches de diferentes características (turismos, camiones, furgonetas, etc), con distintas velocidades, y posiciones, etc. Esto conduce a considerar la fuente de ruido con una distribución lineal de potencia por unidad de longitud.

La potencia de la fuente sonora, en ausencia de toda limitación sobre la velocidad de los vehículos, es proporcional a la densidad de tráfico, debiendo introducirse correcciones en los cálculos, cuando el porcentaje de tráfico debido a camiones es importante, o bien cuando la vía de circulación tiene pendiente y los vehículos circulan en dirección ascendente, así mismo la velocidad media de los vehículos que circulan por la vía influye sobre el nivel de potencia media producido, efectuándose otras correcciones en función de si son vehículos de turismo, furgonetas, autocares etc, como ejemplo, un coche circulando por una autopista genera un nivel de potencia acústica de 100 dB (re 10^{-12} W/m²).

El nivel de presión sonora media varía con la distancia y debería ser menor de 3 dB, cada vez que se dobla la distancia. Experimentalmente se ha podido comprobar que en terreno llano y libre de obstáculos, la atenuación con la distancia es mayor de 3 dB, esto es consecuencia de una atenuación adicional debida al poder de absorción del suelo, así como a los fenómenos de refracción, difusión, condiciones meteorológicas y a la absorción del aire.

El espectro de la energía sonora emitida por una vía rápida, es independiente de la naturaleza del pavimento (adoquines, cemento, asfalto, etc), pero no de su estado. Debido a la absorción del suelo, a medida que nos alejamos, el espectro se modifica.



En zona urbana, la presencia continua de edificios a ambos lados de la vía, refuerza el sonido, debido a las reflexiones que se producen entre las fachadas de los edificios. El ancho de la vía, el tipo de fachada, dimensiones de las aceras, etc, permiten obtener unos valores de la variación del nivel de presión sonora con estos parámetros. Se ha comprobado que en vías con edificios a ambos lados, el nivel de presión es sensiblemente independiente de la altura del punto de observación, mientras que cuando los edificios están a un lado de la vía, el nivel de presión disminuye con la altura.

Otro tipo de fuente de ruido exterior es la debida a los trenes o como el metro, aunque existen pocos datos sobre las mismas. El paso de un tren como fuente de ruido consiste, en que el nivel de presión sonora crece rápidamente, y tanto más deprisa, cuanto más cerca de la vía se encuentre el punto de observación, se estabiliza a un valor llamado máximo, aunque con variaciones, disminuyendo más lentamente de lo que creció, a título indicativo el paso de un tren produce a 30 m de distancia un nivel que varía entre 80 y 100 dB(A).

El ruido generado por esta fuente sonora depende de: *a) sistema de colocación de los raíles y conservación de la vía; b) de la naturaleza y tipo de material rodante; c) de la velocidad; d) de la longitud de los trenes; e) de la naturaleza del suelo*, así como de la altura del punto de observación para las posiciones alejadas.



Figura 1.23. Fuente de ruido externa: Trenes.

En el caso del metro debe evitarse tanto el ruido aéreo dentro del túnel, como la propagación de las vibraciones generadas por su paso y transmitidas a la superficie, ya que se pueden crear problemas, como sucede en el caso del Teatro Real de Madrid; un valor indicativo puede ser el de 80 dB(A).

2) "**Ruido de tráfico aéreo**", los aviones son una fuente de potencia acústica muy importante (en el momento de despegue 100 kilovatios acústicos), y las condiciones de propagación del ruido son muy favorables (espacio sin obstáculos). En las fases de despegue y aterrizaje, es cuando los aviones producen más ruido, ya que la potencia emitida en estos procesos es máxima debido a que los aviones se encuentran en el suelo o muy próximos a él. Cuando los aviones vuelan a gran altura, el ruido que llega a la tierra procedente de los mismos es muy pequeño, como consecuencia de la gran distancia a la que se encuentran.

El ruido producido por el paso de un avión depende: *a) del intervalo de tiempo durante el que el avión genera el ruido*, que emerge del ruido de fondo, o de un valor de referencia seleccionado, *b)*



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

el máximo valor alcanzado por el nivel de presión sonora del ruido y c) el espectro del ruido obtenido por yuxtaposición de los máximos niveles alcanzados en cada banda en estudio.



Figura 1.24. Fuente de ruido externa: tráfico aéreo, aviones.

En el proceso de despegue de los aviones, se pueden mencionar dos fases, una primera de empuje máximo, y la segunda de empuje reducido. Esto se debe, a que los aviones con el fin de que las molestias producidas por el ruido sean mínimas, en el momento del despegue reducen la potencia exigida a los motores en cuanto las condiciones de seguridad lo permiten, logrando que el nivel de presión se reduzca de 8 a 10 dB en todas las frecuencias.

Una vez conocidos los niveles de presión sonora que produce un avión, se pueden predecir características del ruido en los alrededores de los aeropuertos, así como relacionar sus características con las molestias que puede ocasionar el ruido.

Todo lo expuesto anteriormente se refiere al vuelo subsónico, ya que si el vuelo es supersónico se produce un "boom" sónico con un gran nivel de ruido que puede originar enormes vibraciones de las edificaciones en el suelo. Como ejemplos de niveles de potencia producida, se puede mencionar que un motor de reacción puede llegar a producir de 160 a 170 dB, un avión cuatrimotor de 140 a 150 dB, un pequeño motor de avión de 120 a 130 dB, etc, siendo el caso más extremo que se puede mencionar el del cohete Saturno, cuyo nivel de potencia en el despegue alcanzó los 195 dB. El valor de pico que puede alcanzarse en el nivel de presión, a bajas frecuencias (entre 125 y 250 Hz), es de unos 115 dB para aviones de hélice, mientras que para aviones a reacción es de unos 120 dB a 125 Hz.

También debe considerarse el ruido producido por los barcos en los puertos y zonas próximas, originados tanto por los motores como por sus sirenas.

3) **"Ruido debido a las obras públicas"**, estas fuentes de ruido existen en la construcción, debido principalmente a la maquinaria pesada que se emplea, que produce diferentes tipos de ruido, aunque los más frecuentes son los impulsivos y los continuos de nivel fluctuante, como por ejemplo un gran martillo neumático que da un nivel de potencia acústica de 120 dB, taladros, sierras, etc.

4) **"Ruido debido a las actividades industriales"** son los ruidos producidos por la industria en general, cuyo nivel y espectro sonoro puede ser muy variado, ya que depende tanto del procedimiento industrial en si, como de donde se encuentran situadas las industrias y el tipo de construcción que las contiene, proceso de carga y descarga de mercancías, etc.



Este es uno de los motivos por el que los polígonos industriales se han sacado fuera de las poblaciones, con el fin de que estas fuentes de ruido no estuviesen próximas a la zona urbana de viviendas, sobre todo teniendo en cuenta que muchas industrias trabajan las 24 horas del día.

5) **"Ruido debido a actividades urbanas comunitarias"**, estos ruidos se deben a que en algunas zonas de una población existen en determinados intervalos de tiempo, concentraciones de personas que producen ruidos de tipo intermitente con variación de niveles, como por ejemplo en mercados, galerías comerciales, teatros, cines, colegios, multicentros, carga y descarga de mercancías, grandes concentraciones deportivas, etc.

6) **"Ruido debido a los agentes atmosféricos"**, las tormentas son la principal fuente de ruido, con la lluvia, granizo, truenos, etc, que producen bien ruido aéreo, bien ruido de impacto, que en determinadas zonas del país, por sus adversas condiciones climatológicas, tienen una gran importancia, con unos niveles de potencia acústica muy elevados; asimismo el viento genera elevados niveles de ruido.

4.3.2 Fuentes de ruido internas a la edificación

En el hábitat normal de los seres humanos (vivienda), así como en los múltiples recintos que se emplean para diferentes funciones (estudios de grabación, teatros, salas de concierto, emisoras de radio, etc), los seres humanos se comunican a través de la palabra, emitiendo sonidos cuyas características (intensidad y tono) son variables. Las fuentes de ruido internas se deben al empleo de los edificios, así como de sus servicios e instalaciones. El ruido puede ser tanto aéreo como estructural. Al estudiar las fuentes de ruido y sus orígenes, se pueden hacer dos grupos, las *propias* y las *ajenas*. El conocimiento de todo esto permite realizar una adecuada distribución *en planta y altura de los edificios*, así como una distribución general de sus volúmenes.

1) **"Ruido debido a las personas"**, una persona, o un colectivo de personas pueden ser una fuente importante de ruido según en que casos. El nivel de presión que existe en un recinto depende tanto de las características de la persona que habla (potencia acústica), como de las características acústicas y geométricas del local (absorción acústica, tiempo de reverberación, modos propios, etc).

Una conversación con un nivel normal puede producir un nivel de potencia acústica de 70 dB.

Esto sólo sucede cuando el nivel de ruido ambiental, es reducido permitiendo la inteligibilidad de la conversación. Si el nivel de ruido de fondo es elevado, para poder entenderse es necesario elevar el nivel de potencia de la voz, por lo que si en un local hay muchas personas hablando simultáneamente se interfieren entre sí, y como consecuencia se eleva la voz. El nivel de presión acústica aumenta en 3 dB en el local, cada vez que se duplica el número de personas que se encuentran hablando simultáneamente en el mismo a partir de un determinado número de personas, denominándose a esto "efecto coctel".

2) **"Ruido de impactos"**, es un ruido típico que se transmite por la estructura y cuyo nivel y espectro en frecuencias dependen del tipo del suelo, como en el caso de pisadas, salto, movimiento de objetos, etc. Otro tipo de ruido de impactos se presenta al golpear las paredes (fijar clavos, etc). Estos ruidos tienen un espectro importante en bajas frecuencias, que se transmiten con facilidad de un local al otro.

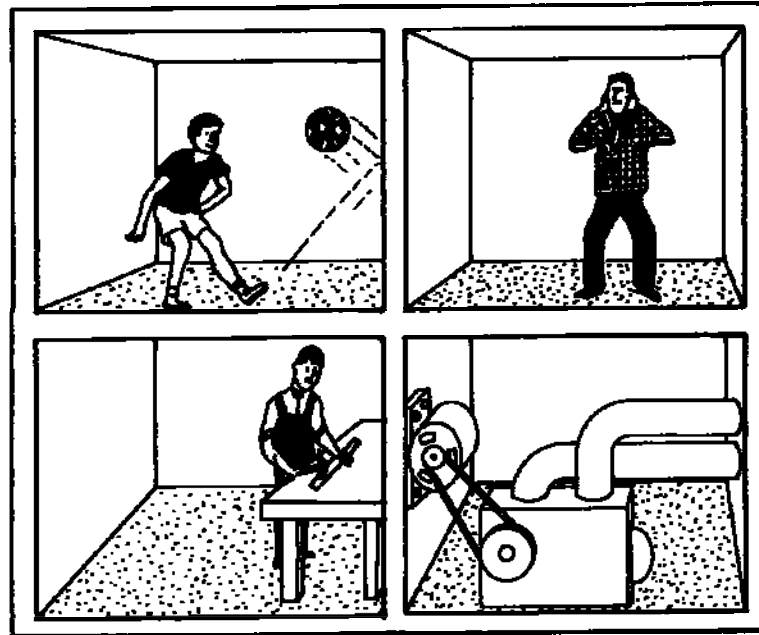


Figura 1.25. Fuente interna: impactos.

3) "**Ruido debido a los aparatos de radio y televisión**", son ruidos cuyo nivel medio, así como las fluctuaciones del nivel instantáneo, dependen principalmente del tipo de programa que se ve o escucha.

Se han realizado estudios estadísticos para valorar la intensidad media que permita una escucha agradable, como dato orientativo, diremos que un aparato de radio a gran volumen produce un nivel de potencia acústica de 100 a 110 dB. En estos ruidos predominan en su espectro las frecuencias bajas y medias.

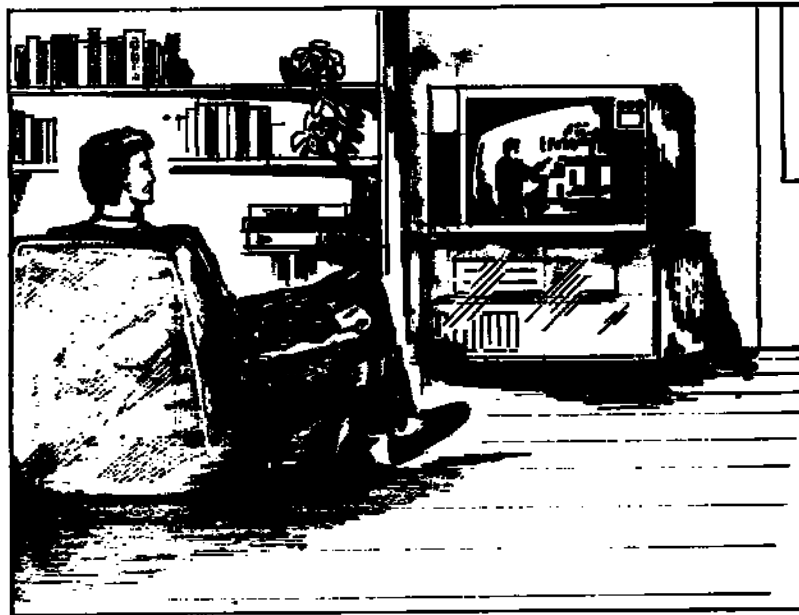


Figura 1.26. Fuente de ruido interna: aparatos de radio y televisión.

4) **"Ruido debido a los instrumentos de música"**, en la actualidad estos ruidos son casi tan frecuentes en las viviendas como los anteriores debidos principalmente a los equipos de alta fidelidad, pudiendo alcanzar niveles de potencia acústica superiores a los 100 dB.

Con relación a los instrumentos musicales más corrientes (de cuerda o viento), pueden generar niveles, como por ejemplo un piano o la tuba de 110 a 120 dB en niveles eficaces de pico, en intervalos de un octavo de segundo en la gama de frecuencias comprendidas entre 50 y 1.500 Hz, otro ejemplo puede ser el de un órgano de tubos o bien una orquesta de 75 instrumentos que produce un nivel de potencia acústica de 130 a 140 dB de niveles eficaces de pico en un intervalo de un octavo de segundo.

5) **"Ruido debido a los aparatos electrodomésticos"**, la mayoría de estos aparatos producen ruido aéreo y estructural (propagación a través del aire, que es el más importante, y propagación por los sólidos, debido a su contacto con paredes y suelo), con un espectro en frecuencias en el que predominan las frecuencias medias y bajas.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

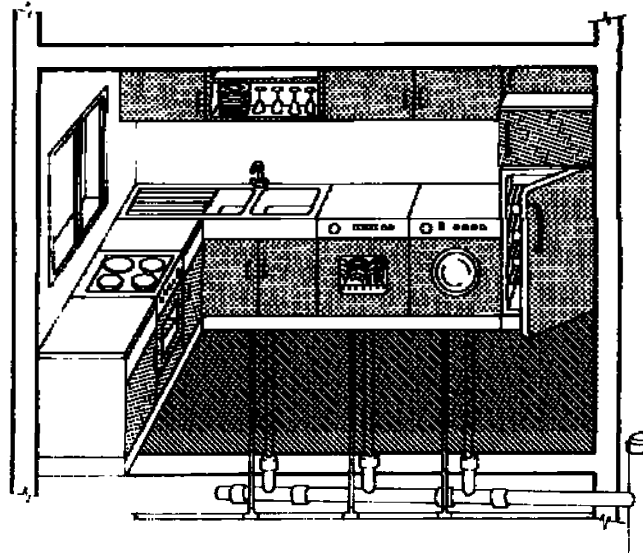


Figura 1.27. Fuente de ruido interna: aparatos electrodomésticos.

Las fuentes más importantes son los lavavajillas, lavadoras, con sus procesos de carga y descarga de agua, nivelado de precisión inadecuado de los electrodomésticos, etc. Los ventiladores pueden producir niveles de potencia acústica de 90 a 100 dB, siendo los electrodomésticos menos ruidosos los frigoríficos.

6) **"Ruido debido a las instalaciones de fontanería"**, son una fuente importante de ruido, tanto en los edificios públicos, como privados, ya que el ruido además de producirse en los sistemas de tuberías se transmite a través de las mismas a toda la estructura (por la canalización y el fluido). Su control es difícil ya que se puede originar en muchos sitios, propagándose por la estructura a través de un complejo mecanismo.

Las canalizaciones son unas vías excelentes para transmitir sus propios ruidos, ya que el flujo de líquidos en tuberías puede ser laminar y turbulento, siendo en este último caso el movimiento del fluido irregular.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

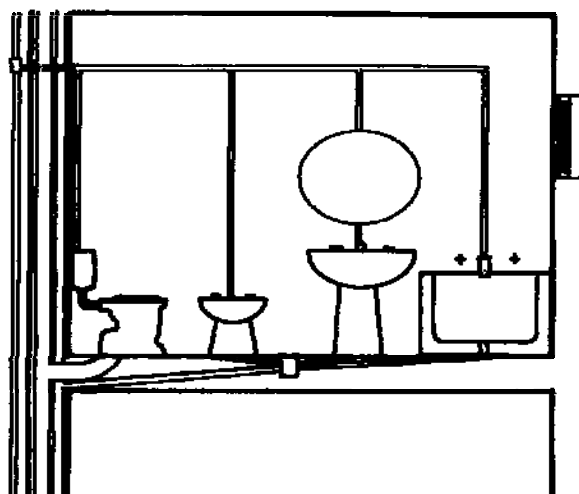


Figura 1.28. Fuente de ruido interna: instalaciones de fontanería.

El que exista un tipo u otro de régimen, va a depender del diámetro de la tubería, de la densidad del fluido, de la viscosidad absoluta, y por último de la velocidad del flujo. Por ejemplo, cuando se alcanzan velocidades superiores a 3 m/s, el régimen es turbulento debido a un diseño incorrecto de las tuberías o de la forma de su sujeción, generando mayores niveles de ruido.

Otra importante fuente de ruido en estas instalaciones son los orificios (grifos), aumentando el ruido que producen, a medida que aumenta la presión y la velocidad, en función de que las válvulas se encuentren total o parcialmente abiertas originando el fenómeno de la cavitación, que se presenta a velocidades bastante críticas y de difícil predicción. El ruido debido a la cavitación aumenta con la frecuencia.

El ruido intenso agudo denominado golpe de ariete, se produce cuando se interrumpe bruscamente un flujo estacionario en un sistema de distribución de líquidos, por ejemplo al cerrar una válvula rápidamente, este ruido se puede eliminar empleando elementos de expansión.

A veces el ruido en sistemas de tuberías se origina en los equipos giratorios, como las bombas, el ruido debido a estas fuentes contiene la mayoría de tonos puros asociados con la velocidad de rotación de la bomba o motor.

Los métodos más frecuentes de reducción de estos ruidos, son el empleo de equipos amortiguadores, el uso de conexiones flexibles, soportes aislantes, equipos absorbentes de golpes, desacoplamiento de elementos, revestimientos y fundas de las paredes de las tuberías. Los ruidos de llenado y vaciado de cisternas, son importantes fuentes de ruido. Haciéndose más intenso a medida que el flujo disminuye por la subida del flotador.

7) "**Ruido debido a instalaciones de calefacción**", las calderas y los quemadores, son las fuentes más importantes de producción y radiación de ruidos, pudiéndose oscilar niveles elevados en el recinto en el que se encuentran situados, con un espectro rico en bajas frecuencias. Estos ruidos, pueden ser de breve duración (golpes de puertas de calderas, etc) o de larga duración en el tiempo (quemadores, etc).



En las calefacciones de tipo individual (estufas transportables, fijas, etc) se debe impedir la propagación del ruido a través de sólidos (paredes, suelos) mediante soportes amortiguadores. Los radiadores eléctricos, originan sistemas vibrantes mecánicos resonantes, produciendo ruidos a frecuencias discretas que se transmiten a los parámetros a través de los soportes de sujeción, por lo que estos deben ser elásticos.

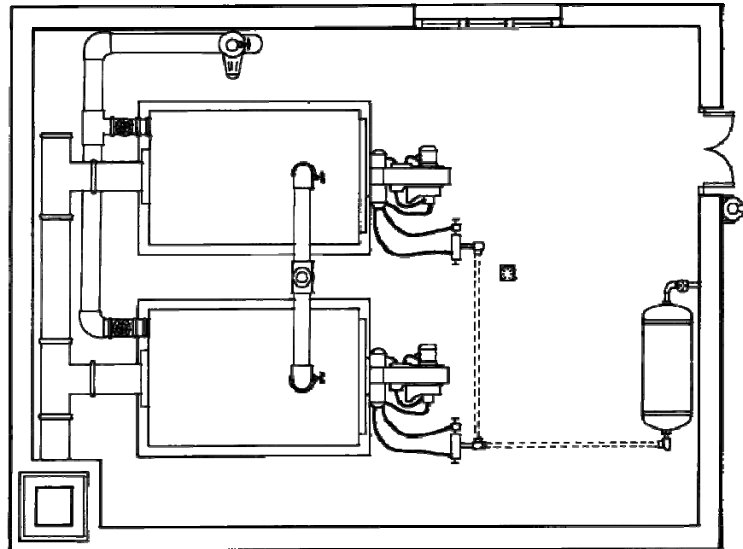


Figura 1.29. Fuente de ruido interna: instalaciones de calefacción.

La calefacción por pisos, debe tener las calderas aisladas de la estructura del suelo, no sujetándose el resto de la instalación a las paredes de separación entre viviendas. En los sistemas de calefacción central, como mejor se evita la propagación de ruidos es montando la caldera sobre unos cimientos con aislamiento a ruido estructural, siempre que los mismos estén en comunicación con el edificio, para el aislamiento a ruido aéreo, se suelen construir paredes y suelos dobles.

8) **"Ruido debido a los ascensores"**, las principales fuentes de ruido son las debidas a los motores de accionamiento, el mando eléctrico, los carriles-guías y las puertas del ascensor. En la maquinaria de accionamiento los ruidos se producen por el motor eléctrico, los engranajes, cojinetes de las poleas y en la conducción del cable. Las máquinas se suelen situar junto a la caja del ascensor, sobre un soporte elástico, con conexiones de tubos y cables no rígidos, el espectro de frecuencias, es rico a las bajas frecuencias.

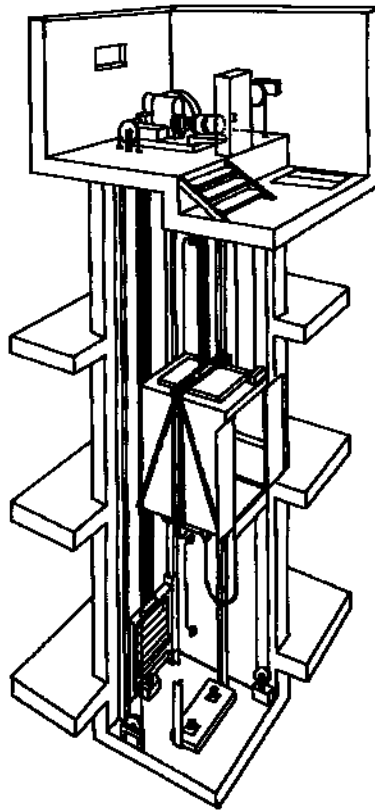


Figura 1.30. Fuente de ruido interna: ascensores, cabinas, cables y caja del ascensor.

Los aparatos de mando, molestan debido a los golpes del relé, pudiendo evitarse montando el aparato de mando, al lado de la maquinaria de accionamiento en los cimientos, o mediante cualquier sistema que los aisle de las vibraciones. Los ruidos de deslizamiento de los carriles de conducción de la cabina, se pueden evitar, empleando ruedas de transporte con goma. Los ruidos debidos a las puertas se evitan haciendo éstas correderas en vez de los de dos hojas. La propagación del sonido por el aire en la caja del ascensor, se evita poniendo material absorbente en las paredes interiores de la caja.

9) **"Ruido debido a las instalaciones de vertederos de basura"**, son fuentes de ruido aéreo y estructural de tipo esporádico, debiendo colocarse lejos de los recintos de bajo nivel de ruido, y con la caja de caída independiente del edificio propiamente dicho, por lo que se le aislará del ruido que se transmite por la estructura. En el diseño de la caja se emplearán materiales de poca resonancia con las compuertas de vertido aisladas de la estructura, mediante juntas elásticas y cierre a presión.

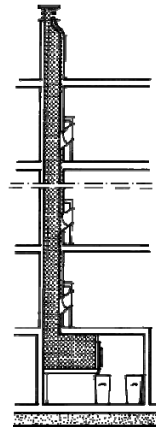


Figura 1.31. Fuente de ruido interna: equipo de vertederos de basuras.

10) "**Ruido debido a instalaciones de ventilación**", es debido a la transmisión a través de los conductos de ventilación de cuartos de baño y cocinas, del ruido aéreo entre distintos locales, e incluso de inmisión de ruido exterior, debiendo diseñarse de tal manera que permitan una separación acústica correcta.

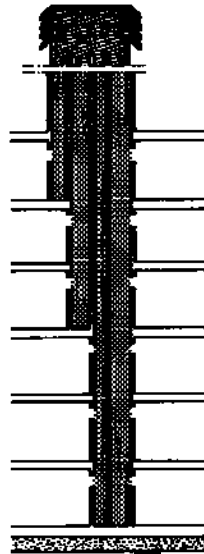


Figura 1.32. Fuente de ruido interna: instalaciones de ventilación.

11) "**Ruido debido a las instalaciones de climatización**", estos sistemas facilitan la propagación de ruidos y vibraciones, desde la maquinaria, a los diferentes recintos, a través de los conductos, por lo que éstos deben tener recubiertas, sus superficies interiores con materiales absorbentes acústicos.

El número de rejillas y difusores así como su diseño son una fuente adicional de ruido, por lo que su diseño aerodinámico debe cuidarse de una forma especial.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

En los acondicionadores de aire de tipo unitario, en su espectro de frecuencias, predominan las bajas frecuencias debiendo estar aislados correctamente de la estructura para evitar la transmisión de estas frecuencias.

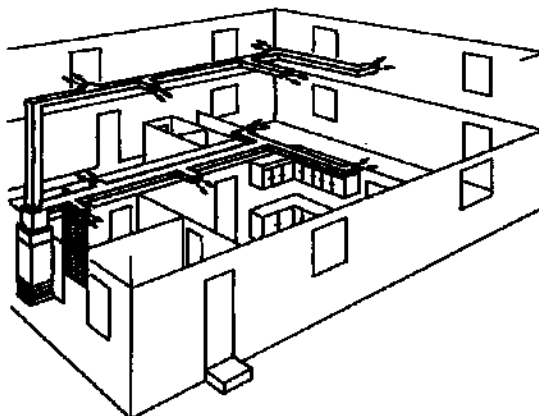


Figura 1.33. Fuente de ruido interna: instalaciones de climatización.

12) **"Ruido debido a las instalaciones eléctricas"**, los sistemas de iluminación con sus reactancias interruptores, relés de conmutación, etc, son una de las principales fuentes de ruido, pudiendo alcanzarse niveles de presión acústica molestos, ya que emiten de una forma continua, frecuencias discretas que son amplificadas por objetos de montaje y de mantenimiento.

Los relés producen ruidos impulsivos, que alcanzan elevados niveles, debiendo montarse sobre soportes elásticos y llevando un revestimiento interior de material absorbente. Si dentro de los edificios existen centros de transformación, éstos son una importantísima fuente de ruido y vibraciones, por lo que los locales en los que se encuentran situados deben tener un adecuado tratamiento acústico.

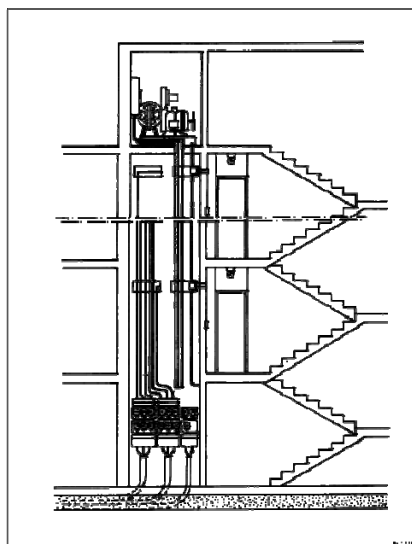


Figura 1.34. Fuente de ruido interna: instalaciones eléctricas.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

13) **"Ruido debido a otras fuentes"**, en este grupo se puede englobar el debido a los animales domésticos, así como cualquier otro que no esté mencionado en los puntos anteriores.



5. ENUNCIADO PROBLEMAS

Como práctica de los conceptos estudiados en este Tema, se proponen a continuación tres problemas. Le invitamos a que los resuelva y compare los resultados obtenidos con las soluciones que se facilitan más adelante.

5.1 Problema 1

A **30 m** de la abertura de un tubo a campo abierto se mide un nivel de presión sonora de **60 dB**. Determinar la potencia acústica radiada **Pot (W)** y el nivel de presión sonora a **5 m** de la abertura.

5.2 Problema 2

Un tono puro de **70 Hz** suena igual de sonoro que otro de **2000 Hz** y **55 dB**. Determinar su nivel de presión sonora y su nivel de sonoridad.

5.3 Problema 3

Dados dos sonidos de **60 dB** y **70 dB** respectivamente, obtener el nivel resultante, suponiendo:

- a) Que son dos sonidos puros de igual frecuencia y en fase en el punto de evaluación.
- b) Que son dos sonidos puros de igual frecuencia y en oposición de fase en el punto de evaluación.
- c) Que son sonidos incoherentes.

6 SOLUCIONES PROBLEMAS

6.1 Problema 1

$$P_{ef} = P_{ref} \cdot 10^{NPS/20} = 0,02 \text{ Pa}$$

De aquí obtenemos



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

$$Pot = 4\pi r^2 I = 4\pi r^2 \frac{P_{ef}^2}{\rho_0 c} = 0,011 \text{ W}.$$

Para determinar el nivel de presión sonora a 5 m, tengamos en cuenta que

$$P_{ef}(5m) = \frac{30}{5} P_{ef}(30m) = 0,12 \text{ Pa} ,$$

de donde

$$NPS = 75,6 \text{ dB} .$$

Otra forma de obtener lo mismo es:

$$NPS = 60 + 20 \log_{10} \frac{30}{5}$$

Esta forma de cálculo es más directa ya que no requiere calcular inútilmente el valor intermedio de la presión eficaz. Se basa en la propiedad del logaritmo de transformar un producto en suma.

6.2 Problema 2

Utilizando las curvas de igual nivel de sonoridad resulta que el tono de **2000 Hz** está en el punto medio entre las curvas de **50 y 60 fon**, es decir que corresponde a un nivel de sonoridad de **55 fon**. Entonces el tono de **70 Hz** tiene el mismo nivel de sonoridad, es decir **55 fon**, que para **70 Hz** implica un nivel de presión sonora de alrededor de **72 dB**. Vemos en este ejemplo cómo a veces es necesario interpolar entre dos curvas.

6.3 Problema 3

a) Para componer sonidos puros con fase definida (como es el caso) necesitamos componer presiones y a partir de su composición obtener el valor de la presión eficaz, finalmente podremos obtener los niveles.

Así pues, se tiene

$$NPS = 60dB \rightarrow 60 = 20 \log \left(\frac{P_1}{P_{ref}} \right) \rightarrow P_1 = 10^3 \cdot P_{ref}$$

$$NPS = 70dB \rightarrow 70 = 20 \log \left(\frac{P_2}{P_{ref}} \right) \rightarrow P_2 = 3,16 \cdot 10^3 \cdot P_{ref}$$

Los valores anteriores son eficaces, por lo que las amplitudes serán $\sqrt{2}$ veces mayores y la amplitud de la onda (en interferencia constructiva) será:



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

$$P_{\max} = \sqrt{2} (P_1 + P_2) \rightarrow P_{\text{eff}} = P_1 + P_2 = 4,16 \cdot 10^3 P_{\text{ref}} .$$

Y por tanto el nivel será de,

$$NPS_{\text{TOTAL}} = 20 \log \left(\frac{4,16 \cdot 10^3 P_{\text{ref}}}{P_{\text{ref}}} \right) = 72,38 \text{dB}$$

b) En este caso la amplitud máxima (y por tanto la presión eficaz) se obtiene restando las amplitudes (las presiones eficaces).

$$P_{\text{eff}} = P_1 - P_2 = 2,16 \cdot 10^3 P_{\text{ref}} \rightarrow NPS = 66,69 \text{dB}$$

c) Si por el contrario suponemos que los sonidos son incoherentes, los debemos componer energéticamente y obtendremos un valor intermedio.

$$NPS_{\text{TOTAL}} = 60 \oplus 70 \text{dB} = 10 \log \left(10^{\frac{60}{10}} + 10^{\frac{70}{10}} \right) = 70,41 \text{dB}$$

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA (T2)

MARCO REGLAMENTARIO CTE Y DB-HR

Acústica Arquitectónica

Edición 2010-2011

Profesor: Juan M. Navarro

UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN ANTONIO DE MURCIA



Contenido

1. CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN	4
1.1 Historia	4
1.2 LOE	4
1.3 Códigos basados en prestaciones	5
1.4 Contexto internacional	6
1.5 La necesidad de un CTE	7
1.6 Descripción	8
1.7 Cumplimiento	10
1.8 El nuevo marco reglamentario	11
1.9 Documentos Reconocidos	12
1.10 Catálogo de elementos constructivos	13
1.11 Principales innovaciones del CTE respecto a la normativa anterior	14
1.11.1 Un nuevo Marco normativo para la edificación	14
1.11.2 Los Requisitos Básicos de la edificación	14
1.11.3 Enfoque por prestaciones	14
1.11.4 Tendencia mundial	15
1.11.5 Ordenación del Código en dos partes	15
1.11.6 Los Documentos Básicos	15
1.11.7 Los Documentos Reconocidos	15
1.11.8 El Registro General del Código	15
1.11.9 Un Código que deberá estar al día	16
1.11.10 Un código participativo	16
1.11.11 La necesidad inmediata de difundir y formar a los técnicos	16
1.12 Innovaciones en el ámbito de la protección frente al ruido	16
1.12.1 Trastornos de la salud debidos al ruido	16
1.12.2 Normativa existente insuficiente	17
1.12.3 Exigencias verificables in situ y frecuentes litigios	17
1.12.4 Las soluciones consideran el ruido de flancos	17



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

1.13 Comentarios sobre el CTE	17
1.14 Contenido y consulta del CTE	18
1.15 Entrada en vigor	22
2. EL DOCUMENTO BÁSICO DE PROTECCIÓN FRENTE AL RUIDO ..	24
2.1 Introducción	24
2.2 Ámbito de aplicación	27
2.3 Generalidades del DB-HR	27
2.4 Exigencias del DB-HR	28
2.4.1 Exigencias a ruido aéreo	28
2.4.2 Exigencias de acondicionamiento acústico	30
2.4.3 Exigencias a ruido de impacto	30
2.5 Procedimiento de verificación	32
2.6 Contenido del proyecto arquitectónico	34
2.7 Los proyectos de acústica	38
2.8 Estructura del proyecto DB-HR	40
2.8.1 La memoria	40
2.8.2 Los planos	41
2.8.3 Pliego de condiciones	41
2.8.4 Mediciones y presupuesto	41
2.9 Desarrollo del proyecto DB-HR	42



1. CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

1.1 Historia

Desde 1957, la preparación de la normativa técnica de la edificación -normas MV- fue responsabilidad del Ministerio de la Vivienda, tarea que antes desarrollaba la Dirección General de Arquitectura del Ministerio de Gobernación, creada en 1937.

En 1977 el Gobierno aprobó un **marco unificado** para la normativa de la edificación compuesto por:

Normas Básicas de la Edificación (NBE), de obligado cumplimiento, dando lugar de NBE a las entonces vigentes normas básicas MV.

Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE), sin carácter obligatorio, aprobadas en esa misma década, que servían como el desarrollo operativo de las NBE.

Soluciones Homologadas de la Edificación (SHE), cuyo desarrollo no ha tenido lugar, que hubieran complementado en el campo de las soluciones constructivas convencionales o tradicionales a los **Documentos de Idoneidad Técnica (DIT)**, evaluaciones técnicas favorables para las soluciones innovadoras otorgadas por el Instituto Eduardo Torroja.

1.2 LOE

El 6 de mayo de 2000 entró en vigor la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE). La Ley **"tiene por objeto** regular en sus aspectos esenciales el proceso de la edificación, estableciendo las obligaciones y responsabilidades de los agentes que intervienen en dicho proceso, así como las garantías necesarias para el adecuado desarrollo del mismo, con el fin de **asegurar la calidad** mediante el cumplimiento de los **requisitos básicos** de los edificios y la adecuada protección de los intereses de los usuarios".

Según la LOE "tendrán la **consideración de edificación...**, y requerirán un **proyecto...** las obras de edificación de nueva construcción, ...las obras de ampliación, modificación, reforma o rehabilitación..., las obras que tengan el carácter de intervención total en edificaciones catalogadas o que dispongan de algún tipo de protección de carácter ambiental o histórico-artístico..." y considera "comprendidas en la edificación sus instalaciones fijas y el equipamiento propio, así como los elementos de urbanización que permanezcan adscritos al edificio".

La LOE establece los siguientes **requisitos básicos** que deben satisfacerse con el fin de garantizar la seguridad de las personas, el bienestar de la sociedad y la protección del medio ambiente:

- los relativos a la **funcionalidad** (utilización, accesibilidad y acceso a los servicios de telecomunicación, audiovisuales y de información)
 - o **Utilización**, de tal forma que la disposición y las dimensiones de los espacios y la dotación de las instalaciones faciliten la adecuada realización de las funciones previstas en el edificio.



- o **Accesibilidad**, de tal forma que se permita a las personas con movilidad o comunicación reducidas el acceso y la circulación por el edificio en los términos previstos en su normativa específica.
 - o **Acceso a los servicios de telecomunicaciones, audiovisuales y de información** de acuerdo con lo establecido en su normativa específica.
- los relativos a la **seguridad** (estructural, en caso de incendio y de utilización)
 - o **Seguridad estructural**, de tal forma que no se produzcan en el edificio, o partes del mismo, daños que tengan su origen o afecten a la cimentación, los soportes, las vigas, los forjados, los muros de carga u otros elementos estructurales, y que comprometen directamente la resistencia mecánica y la estabilidad del edificio.
 - o **Seguridad en caso de incendio**, de tal forma que los ocupantes puedan desalojar el edificio en condiciones seguras, se pueda limitar la extensión del incendio dentro del propio edificio y de los colindantes y se permita la actuación de los equipos de extinción y rescate.
 - o **seguridad de utilización**, de tal forma que el uso normal del edificio no suponga riesgo de accidente para las personas.
- los relativos a la **habitabilidad** (higiene, salud y protección del medio ambiente, protección contra el ruido, ahorro de energía y aislamiento térmico y otros aspectos funcionales).
 - o **Higiene, salud y protección del medio ambiente**, de tal forma que se alcancen condiciones aceptables de salubridad y estanqueidad en el ambiente exterior del edificio y que éste no deteriore el medio ambiente en su entorno inmediato, garantizando una adecuada gestión de toda clase de residuos.
 - o **Protección contra el ruido**, de tal forma que el ruido percibido no ponga en peligro la salud de las personas y les permita realizar satisfactoriamente sus actividades.
 - o **Ahorro de energía y aislamiento térmico**, de tal forma que se consiga un uso racional de la energía necesaria para la adecuada utilización del edificio.
 - o **Otros aspectos funcionales**.

En su Disposición Final Segunda la LOE autoriza al Gobierno para la aprobación de un **Código Técnico de la Edificación** que establezca las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los **requisitos básicos** de **seguridad** y habitabilidad. Hasta que se apruebe el CTE, para satisfacer los **requisitos básicos** se aplicarán las **Normas Básicas de la Edificación (NBE)** y las demás reglamentaciones técnicas de obligado cumplimiento.

Se define un concepto muy importante que es el de **prestación**.

“Conjunto de características cualitativas o cuantitativas, del edificio identificables objetivamente que contribuyen a determinar su aptitud para responder a diferentes funciones para las que ha sido diseñado”

Es decir, las condiciones que proporciona el edificio y le hacen adecuado al uso previsto.

1.3 Códigos basados en prestaciones

Hasta ahora, la normativa de la edificación en la mayoría de los países tradicionalmente ha sido de carácter prescriptivo (establece procedimientos aceptados o guías técnicas). Este tipo de códigos prescriptivos pueden suponer un impedimento a la innovación y al desarrollo tecnológico y representar barreras técnicas, por lo que no son aceptables en el contexto internacional.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

En consecuencia y como alternativa a los códigos prescriptivos, se impone el enfoque basado en el concepto de las prestaciones u objetivos, en el que se establecen explícitamente los objetivos y el modo de alcanzarlos, sin obligar al uso de un procedimiento o solución determinados.

Las prestaciones son el conjunto de características, cualitativas o cuantitativas, del edificio identificables objetivamente que contribuyen a determinar su aptitud para responder a diferentes funciones para las que ha sido diseñado.

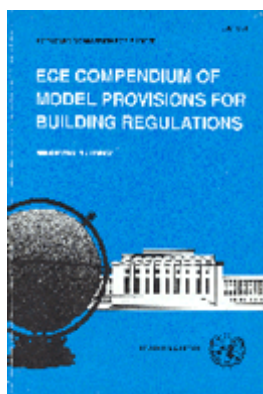
1.4 Contexto internacional

En la Unión Europea se han aprobado en los últimos años una serie de directivas en materia de armonización y normalización técnica de productos. La Directiva sobre Productos de Construcción (DPC), ha establecido básicamente los requisitos esenciales que deben satisfacer las obras de construcción donde los productos de construcción se incorporen de forma permanente. Para la aplicación de la DPC se requirió además elaborar unos Documentos Interpretativos.

Además, el enfoque basado en prestaciones se adoptó en la Unión Europea con la aplicación de la Resolución del Consejo del 5 de mayo de 1985 sobre "el nuevo enfoque" en asuntos de reglamentación técnica.

En otros foros internacionales en los que España ha participado y participa activamente, se plantea como la tendencia más avanzada la reglamentación en términos de prestaciones u objetivos.

- Naciones Unidas: Comisión Económica para Europa, CEPE/HBP/WP2 "Compendio de Disposiciones Modelo de Reglamentos de Edificación"(1990).
- Consejo Internacional de la Edificación (**CIB**): CIB/**TG11** "Códigos de edificación basados en prestaciones", CIB/TG37, programa peBBu (en curso) y Congreso Mundial de Wellington (2001).
- Comité Interjurisdiccional de Cooperación Reglamentaria (**IRCC**) "Guidelines for the Introduction of Performance Based Building Regulations" (1998).



Los países más avanzados en materia de normativa han adoptado este enfoque basado en prestaciones u objetivos, de los que destacamos:



- **Reino Unido** (1984)
- **Nueva Zelanda** (1992)
- **Australia** (1998)
- **Canadá** (1995-2003)
- **Países Bajos** (1996)
- **Suecia** (1994)
- **Noruega** (1998)
- **Estados Unidos** (2001)
 - o Southern Building Code Congress International (SBCCI)
 - o International Code Council (ICC)
 - o Building Officials Code Administrators (BOCA)
 - o International Conference of Building Officials (ICBO)

1.5 La necesidad de un CTE

El sector de la edificación es uno de los principales sectores económicos con importantes repercusiones en el conjunto de la sociedad y en los valores culturales que entraña el patrimonio arquitectónico. Sin embargo, hasta la promulgación de la LOE el sector había carecido de una regulación acorde con esta importancia.

La sociedad española demanda cada vez más calidad en los edificios, lo que significa la satisfacción de los requisitos básicos que se refieren, tanto a la seguridad como a aspectos vinculados al bienestar de las personas.

El CTE se configura como un nuevo marco normativo estructurado que identifica, ordena y completa la reglamentación técnica existente y que pretende facilitar su aplicación y cumplimiento, todo ello en armonía con la normativa europea. Además, mediante un enfoque basado en prestaciones, se tratará de fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico en la edificación

La elaboración del CTE es competencia de la Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda, que cuenta con la colaboración del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

En el desarrollo del CTE asimismo participan otras administraciones competentes en materia de vivienda así como los distintos agentes y sectores que intervienen en el proceso edificatorio.

La Administración General del Estado (AGE) y las Administraciones Autonómicas (CCAA) cooperan en el campo del control de calidad de la edificación a través de la Comisión Técnica para la Calidad de la Edificación (CTCE) que colabora en la elaboración del CTE y sirve de cauce para la participación de todas las Comunidades Autónomas



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

1.6 Descripción

El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE).

Para fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico, el CTE adopta el enfoque internacional más moderno en materia de normativa de edificación: los Códigos basados en prestaciones u objetivos.

El uso de esta nueva reglamentación basada en prestaciones supone la configuración de un entorno más flexible, fácilmente actualizable conforme a la evolución de la técnica y la demanda de la sociedad y basado en la experiencia de la normativa tradicional.

El código se divide en dos partes, ambas de carácter reglamentario.

La primera (**Parte I**) contiene las disposiciones y condiciones generales de aplicación del CTE y las **exigencias básicas** que deben cumplir los edificios. Las exigencias básicas son aquellas que deben cumplirse en el proyecto, la construcción, el mantenimiento y la conservación de los edificios y sus instalaciones para alcanzar las prestaciones que satisfagan los requisitos básicos de la LOE.

La segunda está formada por los denominados **Documentos Básicos (DB)**, en adelante DB, para el cumplimiento de las exigencias básicas del CTE. Estos Documentos, basados en el conocimiento consolidado de las distintas técnicas constructivas, se actualizarán en función de los avances técnicos y las demandas sociales y se aprobarán reglamentariamente.

Los DB contienen:

a) la caracterización de las exigencias básicas y su cuantificación, en la medida en que el desarrollo científico y técnico de la edificación lo permite, mediante el establecimiento de los niveles o valores límite de las prestaciones de los edificios o sus partes, entendidas dichas prestaciones como el conjunto de características cualitativas o cuantitativas del edificio, identificables objetivamente, que determinan su aptitud para cumplir las exigencias básicas correspondientes; y

b) unos procedimientos cuya utilización acredita el cumplimiento de aquellas exigencias básicas, concretados en forma de métodos de verificación o soluciones sancionadas por la práctica. También podrán contener remisión o referencia a instrucciones, reglamentos u otras normas técnicas a los efectos de especificación y control de los materiales, métodos de ensayo y datos o procedimientos de cálculo, que deberán ser tenidos en cuenta en la redacción del proyecto del edificio y su construcción.

Se han desarrollado seis DB, uno para cada uno de los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad. El DB de Seguridad Estructural se subdivide en otros Documentos de carácter específico que tratan diferentes tecnologías.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Los **Documentos Básicos** son los siguientes:

DB SE Seguridad estructural

DB SE-AE Acciones en la edificación

DB SE-A Estructuras de acero

DB SE-F Estructuras de fábrica

DB SE-M Estructuras de madera

DB SE-C Cimentaciones

DB SI Seguridad en caso de incendio

DB SU Seguridad de utilización

DB HS Salubridad

DB HE Ahorro de energía

DB HR Protección frente al ruido.

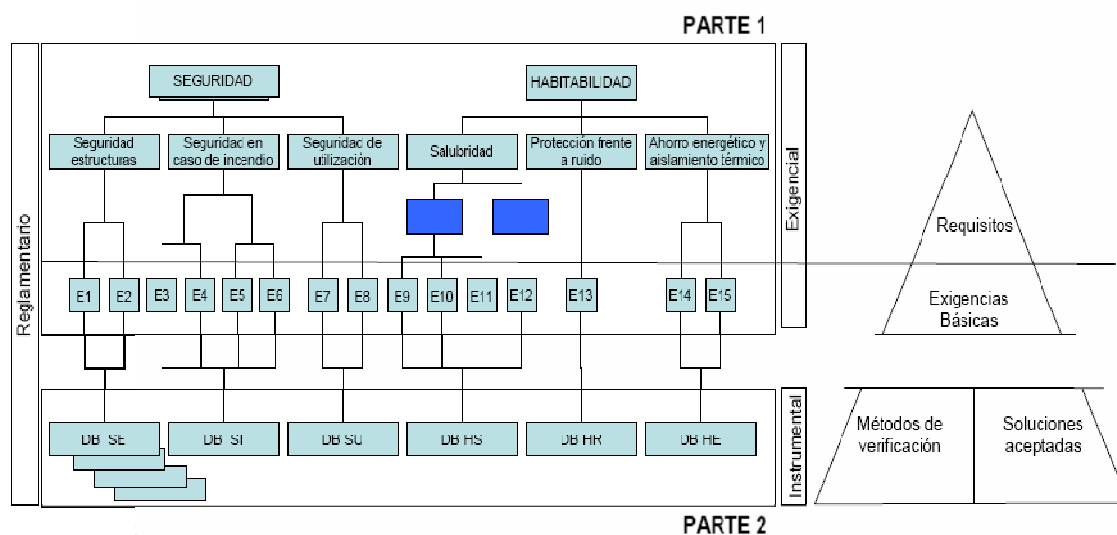
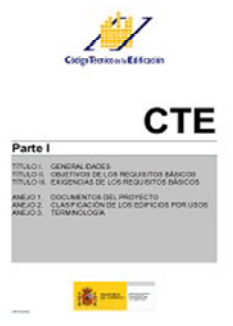


Figura 2.1. Estructura del CTE y sus documentos relacionados.

En la figura anterior se puede observar como la estructura del CTE está dividida en niveles jerárquicos que se describen a continuación:



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

1. Requisitos básicos

- Expresión de los intereses esenciales del usuario en cuanto al edificio y condiciones del mismo que hacen que sea adecuado al uso previsto
- Se establecen en LOE

2. Exigencias

- Condiciones específicas que deben de verificar el diseño del edificio, sus sistemas y productos para cumplir los Requisitos
- Son de carácter técnico y están expresadas en términos cualitativos, y en algunos casos cuantitativamente
- Son el núcleo obligatorio de la CTE

3. Métodos de verificación

- Herramientas para comprobar y demostrar que la solución cumple las exigencias que le afectan

4. Soluciones aceptadas

- Soluciones incluidas en el código que se considera cumplen las exigencias que le afectan.

1.7 Cumplimiento

Serán responsables de la aplicación del CTE los agentes que participan en el proceso de la edificación, según lo establecido en el capítulo III de la LOE.

Para justificar que un edificio cumple las exigencias básicas que se establecen en el CTE para la redacción del proyecto, la ejecución de la obra y el mantenimiento y conservación del edificio podrá optarse por:

- a) Adoptar soluciones técnicas basadas en los DB, cuya aplicación en el proyecto, en la ejecución de la obra o en el mantenimiento y conservación del edificio, es suficiente para acreditar el cumplimiento de las exigencias básicas relacionadas con dichos DB; o



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

- b) Soluciones alternativas, entendidas como aquéllas que se aparten total o parcialmente de los DB. El proyectista o el director de obra pueden, bajo su responsabilidad y previa conformidad del promotor, adoptar soluciones alternativas, siempre que justifiquen documentalmente que el edificio proyectado cumple las exigencias básicas del CTE porque sus prestaciones son, al menos, equivalentes a los que se obtendrían por la aplicación de los DB.

En el artículo 14 de la primera parte del CTE se determinan los objetivos que versan sobre el ruido.

“Exigencias básicas de protección frente al ruido”:

[...] 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.

[...] los edificios se proyectarán, construirán, utilizarán y mantendrán de tal forma que los elementos constructivos que conforman sus recintos tengan unas características acústicas adecuadas para reducir la transmisión del ruido aéreo, del ruido de impactos y del ruido y vibraciones de las instalaciones propias del edificio, y para limitar el ruido reverberante de los recintos.

NOTA: Se recomienda la lectura de la primera parte del CTE incluida en los recursos electrónicos de Documentación Adicional.

1.8 El nuevo marco reglamentario

La aparición del CTE en la escena reglamentaria española supone una serie de cambios en algunos aspectos y ninguno en otros. A continuación se describen.

Junto con el CTE aparecen o aparecerán una serie de documentos que lo complementan y que no son de obligado cumplimiento: los Documentos Reconocidos (cabe destacar el Catálogo de elementos constructivos).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

El CTE recoge el contenido, convenientemente actualizado y reestructurado, de las Normas Básicas de la Edificación (NBE) que desaparecen como tales, salvo la NBE CA-88, que mientras no se apruebe y publique la parte del CTE relativa (DB HR), seguirá vigente.

Las NBE que estaban desarrollándose en el momento de la aprobación de la LOE así como las revisiones en curso de otras NBE existentes han sido adecuadamente incorporadas en los apartados pertinentes del CTE.

Otras reglamentaciones técnicas de carácter básico, como las Instrucciones de hormigón EHE y EF, coexistirán con el CTE y en principio serán referencias externas al mismo.

Las normativas reglamentarias de seguridad industrial dependientes de otros departamentos ministeriales, que afectan a las instalaciones que se incorporan en los edificios, tendrán también su tratamiento específico, de forma que se consideren las competencias relativas a su elaboración y aplicación.

El CTE, tal como establece la LOE, podrá completarse con las exigencias de otras normativas dictadas por las **Administraciones competentes**.

1.9 Documentos Reconocidos

Con el fin de facilitar el cumplimiento de las exigencias básicas del CTE, se establecen los denominados Documentos Reconocidos del CTE, definidos como documentos sin carácter reglamentario, que cuentan con el reconocimiento del Ministerio de Vivienda que mantendrá un registro público de los mismos.

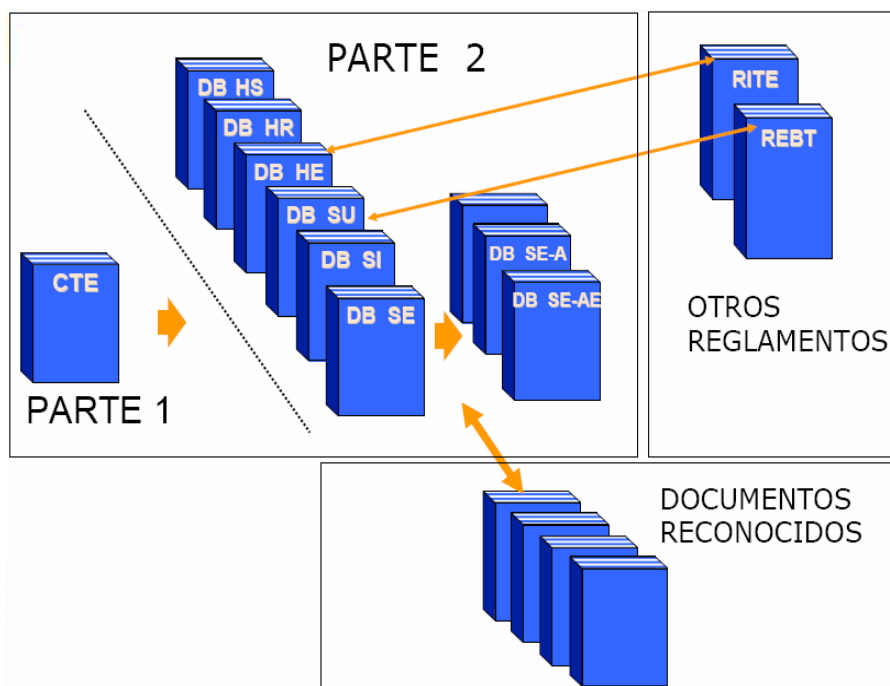


Figura 2.2 Relación de los documentos reconocidos con el CTE.

En la figura 2.2 podemos observar como el CTE se relaciona con otros reglamentos y documentos externos. Se crea la figura de **documentos reconocidos** definiéndose como documentos externos e independientes del CTE cuya utilización facilita el cumplimiento de determinadas exigencias. No tiene carácter reglamentario, pero sí reconocimiento oficial. Pueden ser:

- Especificaciones y guías técnicas o códigos de buena práctica que incluyan procedimientos de diseño, cálculo, ejecución, mantenimiento y conservación de productos, elementos y sistemas constructivos
- Métodos de evaluación y soluciones constructivas, programas informáticos, datos estadísticos sobre las siniestralidad en la edificación u otras bases de datos
- Comentarios sobre la aplicación del CTE
- Cualquier otro documento que facilite la aplicación del CTE, excluidos los que se refieran a la utilización de un producto o sistema constructivo particular o bajo patente

1.10 Catálogo de elementos constructivos

Es un Documento Reconocido de ayuda al proyectista que recoge un conjunto de elementos constructivos, productos y materiales caracterizados con las prestaciones pertinentes en relación al CTE, para facilitar su aplicación.



Las prestaciones de los elementos constructivos que se detallan son las necesarias para aplicar las exigencias relativas a los requisitos de Habitabilidad: el grado de impermeabilidad (Protección frente a la humedad), la transmitancia (Demanda energética), el índice de reducción acústica, el índice global de reducción acústica ponderado A y la masa (Protección frente a ruido), etc.

Este documento tiene carácter voluntario, por lo que el proyectista podrá utilizar cualquier otra solución constructiva no contemplada en él siempre que justifique el cumplimiento de las exigencias establecidas en el CTE.

1.11 Principales innovaciones del CTE respecto a la normativa anterior

1.11.1 Un nuevo Marco normativo para la edificación

El Código Técnico de la Edificación, CTE, es el Marco normativo que fija las exigencias básicas de calidad de los edificios y sus instalaciones, que permiten el cumplimiento de los 'requisitos básicos de la edificación' establecidos en la Ley 38/1999 de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación, LOE con el fin de garantizar la seguridad de las personas, el bienestar de la sociedad y la protección del medio ambiente.

Esta Ley, de la que nace el Código, es el pilar fundamental para el proceso de la edificación, ya que actualiza y completa la configuración legal de los agentes que intervienen en el proceso de la edificación, fija sus obligaciones y establece las responsabilidades y las garantías de protección a los usuarios.

Con el nuevo Código se pretende superar la obsolescencia de la vigente normativa técnica de la edificación, regulada por el Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio, y armonizar la normativa española con la de la Unión Europea.

1.11.2 Los Requisitos Básicos de la edificación

Los requisitos mencionados en la LOE, el núcleo central de la regulación del CTE, abarcan los relativos a la funcionalidad (utilización, accesibilidad y acceso a los servicios de telecomunicación, audiovisuales y de información), los relativos a la seguridad (estructural, en caso de incendio y de utilización) y los de habitabilidad (higiene, salud y protección del medio ambiente, protección contra el ruido, ahorro de energía y aislamiento térmico). El Código Técnico desarrolla, según se indica en la Ley, los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad dejando los de funcionalidad para que sean desarrollados por otros órganos competentes.

Está previsto incluir los requisitos de accesibilidad en tanto que sean las condiciones básicas mínimas de accesibilidad que requiere sean aprobadas por el Gobierno, según lo establecido en la Ley 51/2003, sobre Igualdad de Oportunidades, no discriminación y accesibilidad universal para las personas con discapacidad.

1.11.3 Enfoque por prestaciones

El Código está planteado con un enfoque moderno denominado "por objetivos o prestaciones" que son las exigencias que han de cumplir el edificio o sus partes y las características de sus materiales, productos o sistemas. Este enfoque por objetivos es semejante al adoptado en el ámbito de la Unión Europea y también se alinea con el denominado "enfoque basado en prestaciones", propugnado por las principales organizaciones internacionales relacionadas con los códigos de edificación, tales como el Consejo Internacional para la Investigación e Innovación de la Edificación y



Construcción, CIB, o el Comité Interjurisdiccional de Colaboración Reglamentaria, IRCC. Foros internacionales en los que España participa activamente.

1.11.4 Tendencia mundial

La creciente tendencia en el mundo de introducir códigos basados en prestaciones es fundamental para mejorar la competitividad y eficiencia en el sector de la construcción. Al fomentar la innovación y la flexibilidad en general, los códigos de la edificación basados en prestaciones potencian el uso de nuevas técnicas y prácticas constructivas, conduciendo al aumento de la eficiencia del proceso.

1.11.5 Ordenación del Código en dos partes

El Código tiene dos partes diferenciadas, en la primera parte se fijan las disposiciones generales y las condiciones técnicas y administrativas que deben cumplir las obras de edificación. Además en esta parte se enuncian las llamadas Exigencias Básicas que desarrollan los Requisitos Básicos, y que en número representan dos para seguridad, seis sobre seguridad en caso de incendio, ocho de seguridad de utilización, cinco de higiene salud y protección del medio ambiente, una de protección frente al ruido y cinco de ahorro de energía. En esta parte el Código define además el proyecto y los llamados 'Documentos Reconocidos', estos segundos de singular importancia previsible en este nuevo marco normativo que quiere fomentar la innovación.

1.11.6 Los Documentos Básicos

La segunda parte del Código la componen los Documentos Básicos, DB, de carácter reglamentario y que ofrecen a los proyectistas una serie de métodos y soluciones que se considera cumplen las exigencias del Código. El nuevo marco normativo por lo tanto sigue dando la seguridad jurídica que demandan los técnicos, aunque permite como se ha dicho la innovación.

Los Documentos Básicos, al ceñirse a dar respuesta a cada uno de los seis requisitos básicos establecidos por la LOE, podría decirse que son seis, uno por cada requisito. Sin embargo el requisito básico de seguridad estructural tiene una peculiaridad. Como se verá más adelante, al glosar estos DB, la parte estructural del Código se compone de un conjunto de documentos comunes (seguridad estructural, acciones y cimentaciones) y un documento por cada tipología constructiva contempladas (acero, madera, fábricas de ladrillo y bloques). En esta primera versión del Código no existe un documento sobre estructuras de hormigón, por lo que se hace una referencia a la normativa española de hormigón estructural, EHE, que contempla en su ámbito todo tipo de obras de construcción, incluidas las de edificación.

1.11.7 Los Documentos Reconocidos

Por su parte, los Documentos Reconocidos mencionados anteriormente, serán una serie de documentos externos al Código, que servirán de complemento de los anteriores documentos básicos y que nacen con el objetivo de permitir el mejor cumplimiento del Código contribuyendo al fomento de la calidad de la edificación. Estos documentos permitirán la participación del propio sector en su elaboración y serán reconocidos por el Ministerio de Vivienda. Esta participación se espera sirva para promover la I+D+i también en el propio sector, aspecto fundamental.

1.11.8 El Registro General del Código

Para crear un marco de fomento de la calidad se creará el Registro General del Código en el que se inscribirán y harán públicos además de los documentos reconocidos, los distintivos de calidad u otras evaluaciones técnicas de carácter voluntario que contribuyan al cumplimiento del Código.



1.11.9 Un Código que deberá estar al día

El código se actualizará periódicamente el Código conforme a la evolución de la técnica y la demanda de la sociedad, para lo que se creará la Comisión Permanente del Código Técnico de la Edificación de la que podrán formar parte todos los sectores interesados. En las futuras versiones se deben recoger los avances en el conocimiento de los distintos temas que se obtengan de la llamada investigación prenortativa que se convierte así en un pilar básico para el futuro de la edificación y su reglamentación.

1.11.10 Un código participativo

La elaboración del Código Técnico de la Edificación ha corrido a cargo de la Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda. El Código es un gran proyecto de reglamentación, desarrollado en el plazo récord de cuatro años, en el que ha sido preciso contar con participación de los mejores expertos en cada uno de los temas.

Además de la singular ayuda del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, a través del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, se ha contado con la participación del CEDEX del Ministerio de Fomento, el Instituto para la Diversificación y el ahorro de energía IDAE del Ministerio de Industria, el Instituto Valenciano de la Edificación IVE, el Instituto de la Construcción de Castilla y León ICCL, LABEIN, el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña ITEC, así como distintas universidades y expertos de la industria de la construcción.

Igualmente debe mencionarse por su valía, la participación de los Colegios Profesionales y las Asociaciones del Sector. Enumerar a todos los expertos que de una manera u otra han participado sería imposible en una reseña necesariamente breve como ésta.

1.11.11 La necesidad inmediata de difundir y formar a los técnicos

Por último, la aprobación del CTE supone un nuevo reto para que su éxito esté asegurado. Ello es porque el Código supone un cambio importante en cuanto a la reglamentación, por lo que será necesaria la organización de cursos y seminarios dirigidos a técnicos, la colaboración con las Universidades en la formación de nuevos profesionales, la colaboración con las Comunidades Autónomas, asociaciones y empresas del sector en la organización de cursos de formación. Todo ello haciendo uso de las nuevas tecnologías de comunicación a través de Internet.

1.12 Innovaciones en el ámbito de la protección frente al ruido

1.12.1 Trastornos de la salud debidos al ruido

El ruido en el ámbito edificatorio es causante de frecuentes problemas a los usuarios: trastornos del sueño, pérdida de atención, de rendimiento, cambios de conducta u otros que pueden llegar incluso a causar riesgos para la salud y problemas de estrés. Además, en los últimos años ha aumentado la concienciación social con los problemas del ruido y existe una mayor demanda en la sociedad de incrementar el confort acústico de las viviendas.

La aparición de reglamentación relacionada con los problemas del ruido en edificación, tanto a nivel europeo como a nivel estatal (LOE, Ley del ruido), implica una necesaria adecuación de la normativa acústica existente.



1.12.2 Normativa existente insuficiente

La normativa vigente hasta la entrada del CTE DB-HR, la NBE-CA-88, sobre condiciones acústicas en los edificios únicamente regulaba el aislamiento acústico, dejando otros aspectos también importantes sin regular.

En el Código y su documento básico de protección contra el ruido, DB-HR, además del ruido aéreo y de impactos se incluye también la regulación del ruido reverberante excesivo que produce igualmente molestias y provoca en muchos casos la no inteligibilidad de la palabra, circunstancia que en determinados espacios es crucial. Por ello se ha cuantificado el tiempo de reverberación de recintos donde la comunicación verbal es fundamental, como aulas, comedores, restaurantes y salas de conferencias. Además, se desarrolla con mayor profundidad el capítulo de protección frente al ruido de las instalaciones, mediante la indicación de buenas prácticas constructivas y métodos para minimizar la transmisión de ruido y vibraciones provocados por éstas.

1.12.3 Exigencias verificables in situ y frecuentes litigios

Por otra parte, la manera en que la NBE-CA-88 expresaba los valores límite de cumplimiento de las exigencias de aislamiento, no es la más adecuada actualmente dado que estos límites se establecen en términos de valores verificables en laboratorio de las soluciones constructivas y el aislamiento de los constructivos en proyecto no refleja el comportamiento y el aislamiento real de las soluciones constructivas in situ. Esto tiene el gran inconveniente de no ser una exigencia verificable in situ mediante una medida de aislamiento, derivando en un gran número de litigios y, en definitiva, dejando al usuario desprotegido. Para solucionar este problema, en el DB-HR del CTE se han expresado las exigencias de aislamiento a ruido aéreo y a ruido de impactos mediante parámetros verificables en una medición in situ, y se han aumentado sus niveles de aislamiento.

1.12.4 Las soluciones consideran el ruido de flancos

El planteamiento de las soluciones de aislamiento en el DB-HR es nuevo, ya que se considera que una solución de aislamiento es el conjunto de todos los elementos constructivos que conforman un recinto (tabiques, elemento separador, forjados, fachadas y cubiertas) y no sólo el elemento de separación entre recintos. Este nuevo enfoque surge de la necesidad de eliminar el ruido de flancos

1.13 Comentarios sobre el CTE

El Código Técnico de la Edificación fue publicado en el B.O. del Estado de 28 de marzo de 2006.

La entrada en vigor de sus Disposiciones no se produce a partir de una única fecha, sino que establece un calendario complejo en el que se utilizan varios sistemas que operan conjuntamente (fecha de publicación en el BOE, fecha de la solicitud de la licencia de obras, fecha de concesión de la



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

misma, documentación presentados en el Ayuntamiento con la solicitud de licencia, fecha de inicio de las obras y fecha de terminación de la misma).

La interpretación de las normas que regulan el calendario de entrada en vigor se ha llevado a cabo con un criterio “conservador”, dirigido a evitar situaciones conflictivas con técnicos u organismos que por tener que adoptar decisiones sobre esta misma cuestión puedan tener criterios de interpretación distintos.

Esto no quiere decir que no puedan darse otras interpretaciones tan correctas como las expuestas en estas páginas. Los Servicios Colegiales están dispuestos a defender interpretaciones que den lugar a un calendario más asequible para los colegiados y la Junta de Gobierno a realizar las consultas necesarias para concretar, en la medida de lo posible, el calendario de entrada en vigor del CTE; pero, en tanto no se disponga de criterios oficiales al respecto, consideramos que la interpretación tiene que ser conservadora, ya que, de no ser así, el Colegio podría encontrarse en una posición delicada.

También hay que señalar que las Disposiciones del CTE pueden aplicarse en cualquier momento con carácter voluntario. Si la obra tiene licencia municipal y se quiere adaptar el proyecto a las prescripciones del CTE es posible que sea necesario tramitar un reformado.

1.14 Contenido y consulta del CTE

El CTE es un conjunto de disposiciones que regula CASI TODO el contenido documental de un proyecto, pero el CTE NO CONTIENE TODAS LAS DISPOSICIONES que regula la forma en que debe de redactarse un proyecto. Hay que consultar también las siguientes disposiciones que no se encuentran en el CTE:

- La NCSR-02 sismorresistente
- La EHE y la EFHE sobre estructuras y forjados de hormigón
- El Reglamento Electrotécnico para baja tensión y sus instrucciones técnicas complementarias para las instalaciones eléctricas.
- El RITE para las instalaciones de calefacción y el agua caliente sanitaria, salvo en lo que pueda ser afectado por el Documento Básico del CTE sobre ahorro de energía (DB-HE), que entra en vigor el 29 de septiembre de 2006.
- El RIGLO para las instalaciones de gas.

El contenido del CTE se estructura en la forma siguiente:

1. El Real Decreto 314 / 2006, de 17 de marzo, que es la norma legal que lo aprueba y establece la fecha de entrada en vigor y la fecha de aplicación obligatoria de cada una de las partes y documentos que lo integran.
2. La Parte I del CTE, que contiene los siguientes elementos:



- *Un Índice*
- *Las Disposiciones Generales (arts. 1 a 4 del CTE)*
 - El objeto (art. 1) que es regular las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para cumplir los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad exigidos por la LOE.
 - Su ámbito de aplicación (art. 2), que aplica el CTE a todos los edificios de nueva construcción; también se aplicará a las obras de ampliación, reforma, modificación o rehabilitación de edificios existentes, salvo en los aspectos que sean incompatibles.
 - El contenido del CTE (art. 3), que divide el CTE en dos partes: la parte I, que contiene las disposiciones generales de aplicación y las exigencias básicas que deben de cumplir los edificios; y la parte II, que contiene los denominados “Documentos Básicos” o “DBs”, que contienen la caracterización y cuantificación de las exigencias básicas y los procedimientos cuya utilización acredita el cumplimiento de las exigencias básicas.
 - Los documentos reconocidos del CTE (art. 4), que son documentos técnicos reconocidos por el Ministerio de la Vivienda para lograr una mayor eficacia en la aplicación del CTE.
- *Las Condiciones Técnicas y Administrativas (arts. 5 a 8)*
 - Las condiciones generales de cumplimiento del CTE (art. 5), que establece los criterios generales de aplicación del CTE: agentes responsables, justificación de cumplimiento de las exigencias básicas, controles de calidad, etc.
 - El contenido del proyecto básico y del proyecto de ejecución (art. 6).
 - Condiciones en que debe de llevarse a cabo la ejecución de las obras (art. 7), que no difieren sustancialmente de las vigentes, si bien conviene hacer hincapié en las cuatro siguientes, en las que se subrayan las nuevas obligaciones que impone el CTE:
 - I. “Cuando en el desarrollo de las obras intervengan diversos técnicos para dirigir las obras de proyectos parciales, lo harán bajo la coordinación del director de obra”, que ya estaba establecida en el apartado 1.4.5 del Real Decreto 2.512/1977, aunque sin tanta precisión.
 - II. El director de obra debe recoger documentalmente las modificaciones introducidas en el proyecto y acompañarlas a la documentación de fin de obra como anexo, obligación que ya estaba establecido, pero el CTE exige, en su anejo II.3.3.a), que este anexo lleve la conformidad del promotor, lo que constituye una novedad.
 - III. El CTE señala en su anejo II.1.1.d) que el director de obra tiene que exigir al promotor y/o al constructor la licencia de obras (esto se venía exigiendo habitualmente, por lo que no supone una novedad) y la autorización de apertura del centro de trabajo (esto si constituye una novedad), para lo cual es necesario que el constructor tenga redactado, aprobado y presentado en el Servicio de Relaciones Laborales de la Comunidad Autónoma correspondiente el PLAN DE SEGURIDAD.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

- IV. Toda la documentación de seguimiento de la obra (libro de órdenes, libro de incidencias de seguridad y salud si el coordinador es el arquitecto, modificaciones del proyecto con la conformidad del promotor, el certificado final de obra, la licencia de obras y la autorización de apertura del centro de trabajo) se depositarán en el Colegio cuando finalice la construcción del edificio y toda persona que acredite un interés legítimo (como el Presidente de la Comunidad de Propietarios o el constructor de la obra) podrá solicitar certificaciones de su contenido.
- V. La documentación de la obra ejecutada que debe de entregar el promotor (art. 8). Introduce una importante novedad, ya que establece que el libro del edificio debe de contener un plan de mantenimiento con la planificación de las operaciones programadas para el mantenimiento del mismo y de sus instalaciones e impone a los propietarios del edificio la obligación de encargar a un técnico competente el llevar a cabo las operaciones programadas para el mantenimiento del mismo y de sus instalaciones y realizar las inspecciones reglamentariamente establecidas.

- *Las Exigencias Básicas (arts. 9 a 15)*

El art. 9 analiza estas exigencias con carácter general, remitiéndose a la parte II del CTE para establecer su especificación y cuantificación. Los arts. 10 a 15 determinan cual es el objetivo de cada requisito básico.

El art. 10 se refiere a la seguridad estructural y señala que para alcanzar este objetivo los edificios se proyectarán y construirán con arreglo a los siguientes Documentos Básicos (DBs), que aparecen en la Parte II del CTE.

- Documento Básico SE. Seguridad estructural
- Documento Básico SE-AE. Seguridad estructural – acciones en la edificación
- Documento Básico SE-C. Seguridad estructural – cimientos
- Documento Básico SE-A. Seguridad estructural – acero
- Documento Básico SE-F. Seguridad estructural – fábrica
- Documento Básico SE-M. Seguridad estructural – estructuras de madera

El art. 11 hace referencia a la seguridad en caso de incendio, indicando que para conseguir este objetivo los edificios se proyectarán, construirán, mantendrán y utilizarán de acuerdo con el Documento Básico DB-SI de la Parte II del CTE, excepto los edificios, establecimientos y zonas de uso industrial a los que sea de aplicación “el Reglamento de Seguridad contra Incendios en Establecimientos Industriales”, en los cuales las exigencias básicas se cumplen mediante dicha aplicación.

El art. 12 hace referencia a la seguridad de utilización, indicando que para conseguir este objetivo los edificios se proyectarán, construirán, mantendrán y utilizarán de acuerdo con el Documento Básico DB-SU de la Parte II del CTE, proveyéndose los siguientes riesgos: caídas, golpes, atrapamientos, iluminación inadecuada, ocupación excesiva de recintos o estancias, caídas en piscinas y depósitos, daños por vehículos en movimiento y por la acción del rayo.



El art. 13 hace referencia a las exigencias básicas de salubridad, indicando que para conseguir este objetivo los edificios se proyectarán, construirán, mantendrán y utilizarán de acuerdo con el Documento Básico DB-HS de la Parte II del CTE, con el fin de reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, padezcan molestias o enfermedades, y el riesgo de que los propios edificios se deterioren o deterioren el medio ambiente en su entorno inmediato, para lo cual se establecen una serie de prescripciones en materia de protección frente a la humedad, en materia de recogida y evacuación de residuos, en materia de calidad del aire interior, y en materia de suministro y evacuación de aguas.

El art. 14 hace referencia a la protección frente al ruido, indicando que para conseguir este objetivo los edificios se proyectarán, construirán, mantendrán y utilizarán de acuerdo con el Documento Básico DB-HR.

El art. 15 hace referencia a las exigencias básicas para ahorro de energía, indicando que para conseguir este objetivo los edificios se proyectarán, construirán, mantendrán y utilizarán de acuerdo con el Documento Básico DB-HE de la Parte II del CTE, con el fin de conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, reduciendo a límites sostenibles su consumo e intentando lograr que una parte de ese consumo proceda de fuentes de energía renovables, como consecuencia de las características del proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

- Los anejos

La Parte I del CTE tiene tres anejos: el anejo I hace referencia al contenido de los proyectos básico y de ejecución; el anejo II hace referencia a la documentación del seguimiento de la obra; el anejo III, que contiene la definición de una serie de “conceptos” que el CTE utiliza, bien relativos a los agentes que intervienen en el proceso constructivo (promotor, proyectista, usuario de un edificio....), a la documentación necesaria para su construcción (proyecto, proyecto parcial, licencia municipal,), a elementos de proyecto y/o obra (estructura, particiones, estancias), o a resultados del proceso constructivo o de la utilización de los edificios, que nos parecen los más novedosos (“bienestar térmico”, “demanda energética”, “residuos ordinarios”.....).

La Parte II, que contiene los siguientes documentos básicos:

- Documento Básico HE. Ahorro de energía
- Documento Básico HS. Salubridad
- Documento Básico HR. Protección frente al ruido
- Documento Básico SE. Seguridad estructural
- Documento Básico SE-AE. Seguridad estructural – acciones en la edificación
- Documento Básico SE-C. Seguridad estructural – cimientos
- Documento Básico SE-A. Seguridad estructural – acero
- Documento Básico SE-F. Seguridad estructural – fábrica
- Documento Básico SE-M. Seguridad estructural – estructuras de madera
- Documento Básico SI. Seguridad en caso de incendio
- Documento Básico SU. Seguridad de utilización



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

1.15 Entrada en vigor

Como ya hemos señalado, las Disposiciones del CTE no tienen un plazo único para su aplicación con carácter obligatorio y su calendario de aplicación es complejo.

Según consta en la Disposición Final Cuarta del Decreto, el CTE entra en vigor al día siguiente de su publicación en el BOE, con los matices que más adelante se exponen, por lo que habiéndose publicado en el BOE de 28 de marzo de 2006, la fecha de su entrada en vigor es la de 29 de marzo de 2006.

En consecuencia, las Disposiciones de su Parte I, fundamentalmente las relativas al contenido de los proyectos básicos y de ejecución, se encuentran ya en vigor.

Los Documentos de la Parte II del CTE cuya aplicación se ha demorado hasta seis meses de su entrada en vigor, es decir, hasta el 29 de septiembre de 2006 son las siguientes:

- Documento Básico HE. Ahorro de energía
- Documento Básico SI. Seguridad en caso de incendio
- Documento Básico SU. Seguridad de utilización

Las Documentos de la Parte II del CTE que entran en vigor el 29 de marzo de 2007 son las siguientes:

- Documento Básico HS. Salubridad
- Documento Básico SE. Seguridad estructural
- Documento Básico SE-AE. Seguridad estructural – acciones en la edificación
- Documento Básico SE-C. Seguridad estructural – cimientos
- Documento Básico SE-A. Seguridad estructural – acero
- Documento Básico SE-F. Seguridad estructural – fábrica
- Documento Básico SE-M. Seguridad estructural – estructuras de madera

Finalmente el CTE DB-HR entró en vigor al día siguiente de su publicación en el BOE (23 octubre de 2007). No obstante, para permitir la adaptación al mismo del sector de la edificación, se establece **un periodo de aplicación voluntaria de doce meses** durante los cuales podrá aplicarse, si se prefiere, la NBE CA-88. Los decretos publicados en la misma fecha son:

- Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el **documento básico DB-HR** Protección frente al ruido del Código Técnico de la Edificación y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba Código Técnico de la Edificación, del Ministerio de la Vivienda
- Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la **Ley 37/2003**, de 17 de noviembre, **del Ruido**, en lo referente a la zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, del Ministerio de Medio Ambiente



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica



2. EL DOCUMENTO BÁSICO DE PROTECCIÓN FRENTE AL RUIDO

2.1 Introducción

El nuevo CTE-HR, es el sustituto de la NBE-CA-88, el cual supone un cambio significativo respecto a lo exigido y realizado hasta el momento.

Entre otros aspectos destacan:

- Mayor exigencia de los niveles de aislamiento de los cerramientos; lo que se traducirá en la búsqueda de nuevas técnicas constructivas.
- Niveles de recepción de ruido de impacto menores a los anteriormente exigidos.
- Medición “in situ” de las soluciones constructivas diseñadas; lo que exigirá conocer los requisitos establecidos en las normas técnicas correspondientes.

Esto supondrá nuestra participación en las siguientes tareas:

- Estudio acústico previo de los materiales de construcción: asesoramiento técnico.
- Control en la construcción: seguimiento de la obra.
- Certificación final de obra: medición y evaluación de los cerramientos establecidos.

Los objetivos principales que se marca el CTE DB-HR son:

- **Elevar los niveles** de prestaciones acústicas reglamentarios en la edificación en respuesta de una demanda social generalizada, adecuándolos a la media europea
- Contemplar adecuadamente los **mecanismos de transmisión acústica** entre recintos incluido la transmisión de ruido por flancos, superando así las deficiencias de la NBE-CA en la predicción de la transmisión del ruido entre recintos

La construcción se basa en construir, romper, tapar y cubrir. Se trata de un proceso semiartesanal donde es necesario que cada acción esté bien ejecutada. Se aleja mucho de los procesos industriales y sistematizados porque cada edificio es un prototipo y cada planta del edificio, a pesar de estar diseñadas de forma idéntica, no se puede garantizar que se construyan igual: se puede desplazar una pared, un tabique, poner menos mortero en las juntas, perforar más una pared o un forjado, etc. Todas las obras suelen sufrir estos cambios.

Hablamos de construcción porque hablamos de acústica. Cada material y cada sistema que utilizamos en una vivienda tienen un comportamiento acústico. Es necesario tener una visión global de la obra para afrontar el problema del aislamiento acústico, ya que es algo difícil de conseguir en



construcción. Intervienen dos mundos radicalmente diferentes; por una parte el mundo de la física, con sus conceptos teóricos y exactos para proyectar, y por otra parte, el mundo artesanal, con la mano de obra y la unión de diversos materiales. Ambos mundos han de trabajar correctamente.

Estos son los dos mundos que intenta regular el DB-HR. ¿Lo conseguirá? Resulta difícil saber cómo afectará a la práctica edificatoria porque el DB-HR plantea algunos interrogantes y además, en este país, nunca hemos aislado acústicamente. Lo más probable es que de aquí a unos años, ya nadie cuestione el hecho de colocar aislamiento acústico, de la misma forma que ahora nadie se cuestiona la colocación de aislamiento térmico. Todos juntos debemos empezar a familiarizarnos con esa gran desconocida que es la ciencia acústica.

El DB-HR será una de las partes del CTE que más afectarán al sector de la construcción. Comporta dos ejes principales: visión global acústica del edificio y la imposición como método de comprobación las medidas in situ. El CTE considera el edificio acabado como un producto. Por lo tanto, se exigen las prestaciones acústicas al edificio en su conjunto y no a cada uno de sus elementos constructivos, como lo hacía hasta ahora la NBE CA-88.

Se tiene que tener en cuenta la problemática acústica desde el principio de la realización del proyecto, porque nos condicionará muchas de las posibles soluciones y la colocación de los materiales correspondientes.

El DB-HR nos obliga a proyectar y construir los edificios regulando los siguientes aspectos:

- **Aislamiento a Ruido Aéreo y de Impactos** procedentes de:
 - Otras unidades de uso
 - Zonas comunes de la edificación
 - Recintos de actividad y de instalaciones
 - El exterior. Vinculado con la *Ley de Ruido*
- **Acondicionamiento acústico** mediante condiciones acústicas en:
 - Zonas comunes: Absorción acústica
 - Aulas, restaurantes, comedores, salas de conferencias: Tiempo de reverberación
- Control del ruido y de las vibraciones de las **instalaciones**:

El DB-HR quiere cuantificar la protección entre usuarios ya que el problema es de índole social y no tiene que ver con la fatiga de los materiales. El DB-HR caracteriza y cuantifica las exigencias con valores limitados, pero también explica como diseñar y dimensionar los diferentes sistemas para tener los aislamientos necesarios. Para obtener los nuevos valores de aislamiento, no lo solucionaremos dándoles más espesor a los materiales sino **cambiando los sistemas constructivos**.

Con el DB-HR, dejamos de hablar de aislamiento entre particiones para hablar de aislamiento entre recintos, pues tenemos en cuenta las transmisiones laterales.

Necesitamos nuevas herramientas de predicción para saber si, con los elementos que estamos construyendo, cumplimos con los niveles acústicos exigidos. Es por esta razón que el DB-HR nos presenta dos caminos para proyectar las soluciones acústicas: el método **simplificado** con soluciones ya estipuladas o el método **general** en el que se ha de calcular cada paramento. Para esta segunda opción, será necesario utilizar las hojas de cálculo creadas por el ministerio o software de pago, como Acoubat-dBMat, una gran base de datos con un programa de cálculo sencillo que ayuda a realizar la predicción de los aislamientos acústicos.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Lo más probable es que la opción favorita de los proyectistas sea el método simplificado. Son soluciones que determinan el grado de aislamiento a través de una serie de medidas en construcciones reales. Estas soluciones están **sobredimensionadas** y aseguran estar por encima de los índices del DB-HR, siempre y cuando la ejecución sea la correcta.



Figura 2.3. Sistema mixto cerámica y placas de yeso con paso de instalaciones.

En el **cálculo simplificado** el procedimiento radica en escoger en el siguiente orden los diferentes cerramientos:

1. los tabiques que necesitamos
2. los elementos de separación horizontales y verticales
3. las medianeras
4. las fachadas

Una vez realizado el recorrido obtenemos todos los paramentos necesarios sin calcular nada. Justificaremos esta solución simplificada en el proyecto a través de los ensayos de los fabricantes y empleando unas fichas justificativas parecidas a las de la NBE CA-88. Sin embargo, de momento los ensayos de los fabricantes sólo dan sus primeros pasos y si los comparamos, los resultados conseguidos son muy diferentes para elementos similares. Como mínimo serán necesarios tres años para lograr sistemas constructivos probados y fiables de acuerdo con el DB-HR, por lo que se deja la puerta abierta a otras soluciones constructivas justificadas mediante el cálculo.

Como complemento de los DB, se establecen los **Documentos Reconocidos**, documentos con soluciones ya establecidas y cuya última versión de Mayo tenéis en las lecturas complementarias.

Una novedad importante es el hecho plantear el aislamiento acústico de la fachada teniendo en cuenta el nivel de ruido exterior. Se tendrá que saber con claridad en qué lugar se situará el edificio y qué nivel de ruido tiene asignado según los mapas de ruido. Según la normativa actual todas las fachadas son iguales y cuesta explicar a un usuario de una vivienda próxima a una carretera importante o un aeropuerto, que el edificio no está mal construido sino que él vive en un entorno muy contaminado.



2.2 Ámbito de aplicación

Este Documento Básico (DB) tiene por **objeto** establecer reglas y procedimientos que permiten cumplir las exigencias básicas de **protección frente al ruido**. Su ámbito de aplicación se establece con carácter general para el CTE en el artículo 2 (Parte I) **exceptuando**:

- Los **recintos ruidosos**, que se regirán por su reglamentación específica;
- Los **recintos** y edificios destinados a espectáculos, tales como auditorios, salas de música, teatros, cines, etc., que serán objeto de estudio especial en cuanto a su diseño, y se considerarán **recintos de actividad** respecto a los *recintos protegidos* y a los *recintos habitables* colindantes.
- Las **aulas y las salas de conferencias** cuyo **volumen** sea mayor que **350 m³**, que serán objeto de un estudio especial en cuanto a su diseño, y se considerarán *recintos protegidos* respecto de otros *recintos* y del exterior.
- Las obras de ampliación, modificación, reforma o rehabilitación en los **edificios existentes**, salvo cuando se trate de rehabilitación integral.

NOTA: Se recomienda la lectura del DB-HR hasta la página 8 incluida, disponible en la **Documentación Adicional**.

2.3 Generalidades del DB-HR

El primer apartado del DB-HR resalta la inclusión de unos mecanismos de transmisión acústica entre recintos. A diferencia de la NBE-CA, en esta nueva norma se tienen en cuenta las transmisiones por flancos lo que permite diseñar soluciones más cercanas a la puesta en obra y con posibilidad de ser certificadas mediante mediciones después de la instalación.

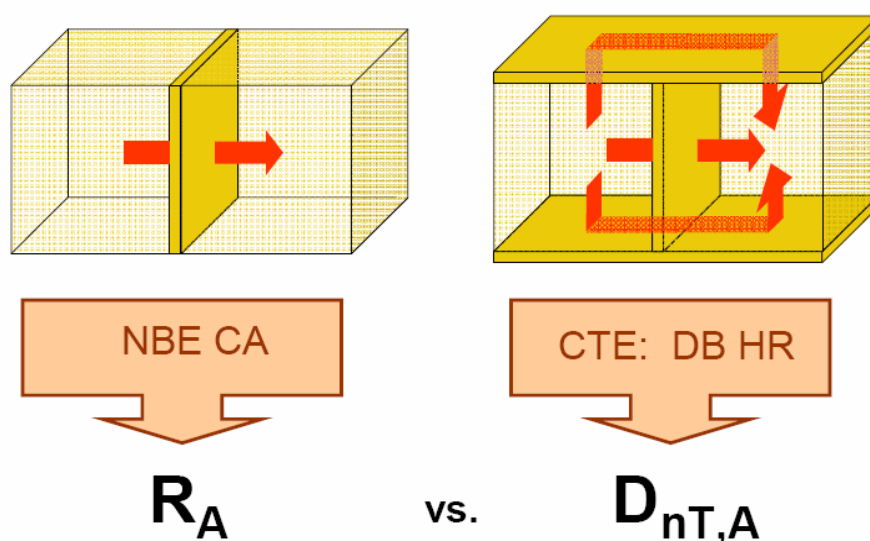


Figura 2.4 Inclusión de la transmisión del ruido por flancos en el DB-HR.



Otra novedad a resaltar es la relación entre la Ley del Ruido y el DB-HR. Dicha Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido tiene como objetivo; prevenir, vigilar y reducir la contaminación acústica. Entre otras medidas, presenta la elaboración, aprobación y revisión de mapas de ruido que proporcionan información L_{den} y L_{night} realizando una clasificación de áreas acústicas con el objeto de que el gobierno establecerá los objetivos de calidad acústica en cada área.

Define a las Edificaciones como receptores acústicos y basándose en los resultados obtenidos en los diferentes estudios el gobierno establecerá los índices de calidad acústica del espacio interior de las edificaciones destinadas a usos residenciales, sanitarios, docente o cultural .

La Ley del Ruido demanda al CTE un sistema de verificación acústica de las edificaciones. Por su parte, el DB HR protección frente al ruido aporta las exigencias del aislamiento acústico frente al ruido exterior en función del índice de ruido día L_d , proporcionando un **método de cálculo** para el aislamiento de fachadas y cubiertas. Además proporciona un **conjunto de soluciones** de aislamiento para el cumplimiento de las exigencias.

2.4 Exigencias del DB-HR

Las nuevas exigencias acústicas van a suponer necesariamente **cambios en los sistemas y procedimientos constructivos**, y lógicamente un **esfuerzo de adaptación** por parte de **todos los agentes**, pero es absolutamente necesario para alcanzar los niveles de prestación exigidos por la ciudadanía.

“Con la construcción actual es muy difícil alcanzar los niveles de transmisión acústica adecuados, acordes con el entorno europeo al que debemos converger”

2.4.1 Exigencias a ruido aéreo

Una de las grandes diferencias con respecto a la NBE CA-88 es la definición de los diferentes índices para cada tipo de ruido y situación que estudiaremos en profundidad en los siguientes temas. La ventaja de dichos índices es poder calcular y comprobarlos una vez acabado el edificio.

En comparación con la NBE CA-88, el DB-HR incrementa los índices de aislamiento para responder a las demandas de confort acústico. Pero dicho incremento no es muy importante, tal y como comprobaremos en las siguientes tablas. A la hora de comprobarlos, con medidas in situ, nos permite aplicar tolerancias de 3 dB. Es por esta razón que nos ha parecido muy interesante mostrar una tabla comparativa, para recintos protegidos con los niveles exigidos por la NBE CA-88, el DB-HR y el DB-HR con las tolerancias que nos permite a la hora de medir.



Receptor	Emisor	NBE CA-88	DB-HR	DB-HR tolerancias de les mesures
		R_A	D_{nTA}	D_{nTA}
Usuario	Recintos protegidos	> 45 dBA	> 50 dBA	> 47 dBA
	Recintos habitables	> 45 dBA	> 45 dBA	> 42 dBA
	Local de instalaciones a recinto protegido	> 55 dBA	> 55 dBA	> 52 dBA
	Local de instalaciones a recinto habitable	> 55 dBA	> 45 dBA	> 42 dBA
	Zonas comunes sin oberturas	> 45 dBA	> 45 dBA	> 42 dBA
	Zona común con oberturas	> 45 dBA	obertures > 20 dBA mur > 54 dBA	> 17 dBA
	Locales comerciales	> 45 dBA	> 55 dBA	> 52 dBA
Medianeras	Solar vecino sin edificar	--	D _{2m,nT Atr} > 40 dBA	--
	Solar vecino edificado	--	> 50 dBA	--
	Ruido aéreo exterior	NBE CA-88	DB-HR	DB-HR tolerancias
		a_g	D_{2m,nT Atr}	D_{2m,nT Atr}
Fachadas	ruido de tráfico	> 30 dB	> 30 a 47 dB	> 27 a 43 dB

A pesar de tener índices de aislamiento diferentes, son comparables y por lo general el RA tiende a ser igual o 1 dB por encima de DnTA. Se trata de una diferencia poco importante porque el índice RA no tiene en cuenta las transmisiones laterales. El RA caracteriza el elemento constructivo y el DnTA el elemento y sus condiciones de contorno.

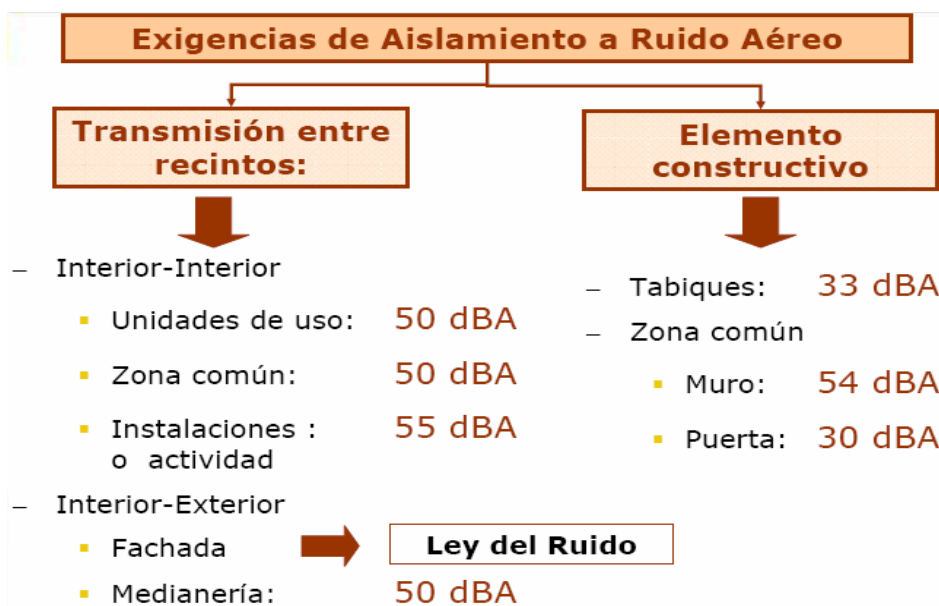
Hay que aislar más las paredes vecinas que las fachadas, porque el ruido que puede llegar a generar un vecino supera el que procede de la calle. El vecino puede tener la televisión con un volumen alto, hablar chillando, tocar el piano o dedicarse al bricolaje los domingos por la mañana. Genera un ruido discontinuo que molesta más que el sonido del tráfico que es más continuo. Así pues, nos tenemos que proteger del vecino.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

En la figura siguiente se presenta un resumen de las exigencias a ruido aéreo.



2.4.2 Exigencias de acondicionamiento acústico

El DB-HR también pide el control de la reverberación en las zonas comunes. Los acabados superficiales y los revestimientos de las zonas comunes deberán tener una absorción mínima de 0,2 m², ya que así el sonido que se genera en los pasillos no será excesivo. La transmisión de ruido de las zonas comunes es elevada a través de la puerta de entrada y sobre todo, a través de la junta inferior de la puerta con el pavimento.

Respecto al tiempo de reverberación, las exigencias tendrán un ámbito de aplicación que afecta a aulas hasta 350 m³, salas de conferencias hasta 350 m³, comedores y restaurantes estableciendo los siguientes valores límite.

Aulas Salas de conferencias	Vacías (sin ocupación y sin mobiliario)	$T \leq 0,7 \text{ s}$
	Absorción butacas fijas	$T \leq 0,5 \text{ s}$
Comedores y restaurantes		$T \leq 0,9 \text{ s}$

2.4.3 Exigencias a ruido de impacto

El ruido de impacto no se cuantifica como el aéreo. El ruido aéreo es el nivel de aislamiento que nos da una pared o un forjado. En cambio, el ruido de impacto es la cantidad de ruido que deja pasar el forjado. Si damos un golpe al forjado, el recinto inferior tiene que recibir un nivel inferior a 65 dB, por lo tanto se tiene que incrementar en 15 dB la protección.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Ruido de impacto	NBE CA-88	CTE
	L_{nT}	
Entre recintos	< 80 dBA	< 65 dB
Local comercial	--	< 60 dB
Local de instalaciones	< 80 dBA	< 60 dB
Cubierta transitable	< 80 dBA	< 65 dB

Exigencias de Aislamiento a Ruido de Impactos

Transmisión entre recintos:

– Interior-Interior

- Unidades de uso o zona común: **65 dB**
- Instalaciones o actividad: **60 dBA**

Ya hemos visto los índices y como aumentado ligeramente la protección del usuario. Comentemos que según un estudio de medidas realizadas en Galicia, realizado en forjados reticulares de 25+5 cm, se ha podido comprobar que sólo cumplían el DB-HR el 26% de los forjados para los niveles de aislamiento aéreo y el 41,2% para los niveles de impacto. Es un dato sorprendente que indica que será necesario dotar de más aislamiento a los forjados con un suelo flotante.

A la solución al ruido de impacto la llamamos de corte elástico porque colocamos un elemento elástico y amortiguador entre el forjado y el pavimento, un suelo flotante desvinculado del forjado con lana mineral de alta densidad o con polietileno reticulado de 5 a 20 mm de grosor. Y por encima, una capa de mortero armada de 5 cm para recibir el pavimento.



Comparativa con Europa del ruido aéreo:

País	D_{nT}
Holanda	56
Finlandia	56
Austria	54
Alemania	54
Bélgica	54
Francia	53
Polonia	52
Reino Unido	51
Italia	51
Portugal	51
Grecia	50
España CTE	50
España NBE	45

Comparativa con Europa del ruido de impacto:

País	L_n
Austria	50
Alemania	53
Finlandia	53
Polonia	58
Portugal	60
Francia	60
Bélgica	60
Holanda	61
Reino Unido	62
Italia	63
Grecia	64
España CTE	65
España NBE	80

Las comparaciones nos muestran que a pesar del salto cualitativo del DB, seguimos a la cola en la protección contra el ruido. Más bien parece un primer intento para adquirir poco a poco la costumbre de construir mejor y conseguir mejores niveles en el futuro. Además de no asustar los promotores con elevados niveles de aislamiento y sus grandes repercusiones a la hora de construir.

NOTA: Se recomienda leer y usar el Anejo A del DB-HR donde se define terminología importante para comprender el análisis del documento. Se definen términos como **recinto**, **recinto habitable**, **recinto protegido**, **recintos instalaciones**, etc.

2.5 Procedimiento de verificación

Para satisfacer las exigencias del CTE deben; alcanzarse los valores límite de *aislamiento acústico a ruido aéreo* y no superarse los valores límite de *nivel de presión de ruido de impactos*. (A2.1), no superarse los valores límite de *tiempo de reverberación*.(A2.2) y cumplirse las especificaciones referentes al ruido y a las vibraciones de las instalaciones.(A2.3)

Para su correcta aplicación debe seguirse la secuencia de verificaciones siguiente:

- Cumplimiento de las condiciones de diseño y de dimensionado del *aislamiento acústico a ruido aéreo* y del *aislamiento acústico a ruido de impactos* de los recintos de los edificios.
 - o Opción simplificada. (A3.1.2)
 - o Opción general. (A3.1.3)



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

- Cumplimiento de las condiciones de diseño y dimensionado del tiempo de reverberación y de absorción acústica de los *recintos* afectados por esta exigencia. (A3.2)
- Cumplimiento de las condiciones de diseño y dimensionado referentes al ruido y a las vibraciones de las instalaciones. (A3.3)
- Cumplimiento de las condiciones relativas a los productos de construcción. (A4)
- Cumplimiento de las condiciones de construcción. (A5)
- Cumplimiento de las condiciones de mantenimiento y conservación. (A6)

Para satisfacer la justificación documental deben cumplimentarse las fichas justificativas de los anexos, que se incluirán en la memoria del proyecto.

M.1 Fichas justificativas de la opción simplificada de aislamiento acústico
Tabla M.1 Fichas justificativas del cumplimiento de los valores límite de aislamiento acústico mediante la opción simplificada.

Elementos de separación horizontal y vertical entre recintos.

Debe comprobarse que se satisfacen las soluciones de aislamiento del apartado 3.1.2.3 para los elementos de separación vertical y horizontal situados entre:

- a) recintos de unidades de uso diferentes;
- b) un recinto de una unidad de uso y una zona común;
- c) un recinto de una unidad de uso y un recinto de instalaciones o un recinto de actividad.

Debe rellenarse una ficha como ésta, para cada conjunto de elementos de separación horizontal y vertical diferente, proyectados entre a), b) y c)

Solución de elementos de separación horizontal y vertical entre:

Elementos constructivos	Tipo	Características de proyecto	Exigidas en tablas
Elemento de separación vertical	Elemento base	m (kg/m ²)=	≥
	Trasdoso	R_a (dBA)=	≥
Elemento de separación horizontal	Forjado	m (kg/m ²)=	≥
	Suelo flotante	R_a (dBA)=	≥
	Techo suspendido	ΔR_a (dBA)=	≥
Tabiquería		m (kg/m ²)=	≥
Muro con puertas y/o ventanas	Puerta	R_a (dBA)=	≥
	Muro	R_a (dBA)=	≥

Medianerías. (apartado 3.1.2.4)

Tipo	Características de proyecto	Exigidas
	R_a (dBA)=	≥ 45

Fachadas, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior (apartado 3.1.2.5)

Solución de fachada, cubierta o suelo en contacto con el aire exterior:

Elementos constructivos	Tipo	Área m ²	% Huecos	Características de proyecto	Exigidas
Parte ciega		$\geq S_a$		$R_{a,av}$ (dBA)=	≥
Huecos		$\leq S_b$		$R_{a,av}$ (dBA)=	≥

(1) Área de la parte ciega o del hueco vista desde el interior del recinto considerado.

Cubiertas transitables. (apartado 3.1.2.5.1)

Solución de cubierta transitable en:

Elementos constructivos	Tipo	Características de proyecto	Exigidas
Forjado		m (kg/m ²)=	≥
Elemento de cobertura		ΔL_w (dB)=	≥

Figura 2.5 Ejemplo de ficha justificativa para la verificación.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

2.6 Contenido del proyecto arquitectónico

En el **Anejo I** de la Primera parte de la CTE se relacionan los contenidos del proyecto de edificación, sin perjuicio de lo que, en su caso, establezcan las Administraciones competentes.

Los marcados con asterisco (*) son los que, al menos, debe contener el Proyecto Básico.

Cuando el proyecto se desarrolle o complete mediante proyectos parciales u otros documentos técnicos (es el caso que nos ocupa con el proyecto del DB-HR), en la memoria del proyecto se hará referencia a éstos y a su contenido, y se integrarán en el proyecto por el proyectista, bajo su coordinación, como documentos diferenciados de tal forma que no se produzca duplicidad de los mismos, ni en los honorarios a percibir por los autores de los distintos trabajos.

A continuación se reproduce el contenido de este Anejo:



Contenido del proyecto	Observaciones
I. Memoria	
1. Memoria descriptiva	Descriptiva y justificativa, que contenga la información siguiente:
1.1 Agentes*	- Promotor, proyectista, otros técnicos.
1.2 Información previa*	- Antecedentes y condicionantes de partida, datos del emplazamiento, entorno físico, normativa urbanística, otras normativas en su caso.
	- Datos del edificio en caso de rehabilitación, reforma o ampliación. Informes realizados.
1.3 Descripción del proyecto*	- Descripción general del edificio, programa de necesidades, uso característico del edificio y otros usos previstos, relación con el entorno.
	- Cumplimiento del CTE y otras normativas específicas, normas de disciplina urbanística, ordenanzas municipales, edificabilidad, funcionalidad, etc.
	- Descripción de la geometría del edificio, volumen, superficies útiles y construidas, accesos y evacuación.
	- Descripción general de los parámetros que determinan las previsiones técnicas a considerar en el proyecto respecto al sistema estructural (cimentación, estructura portante y estructura horizontal), el sistema de compartimentación, el sistema envolvente, el sistema de acabados, el sistema de acondicionamiento ambiental y el de servicios.
1.4 Prestaciones del edificio*	- Por requisitos básicos y en relación con las exigencias básicas del CTE. Se indicarán en particular las acordadas entre promotor y proyectista que superen los umbrales establecidos en el CTE.
	- Se establecerán las limitaciones de uso del edificio en su conjunto y de cada una de sus dependencias e instalaciones.
2. Memoria constructiva	Descripción de las soluciones adoptadas
2.1 Sustentación del edificio*	- Justificación de las características del suelo y parámetros a considerar para el cálculo de la parte del sistema estructural correspondiente a la cimentación.



2.2 Sistema estructural (cimentación, estructura portante y estructura horizontal)	- Se establecerán los datos y las hipótesis de partida, el programa de necesidades, las bases de cálculo y procedimientos o métodos empleados para todo el sistema estructural, así como las características de los materiales que intervienen.
2.3 Sistema envolvente	- Definición constructiva de los distintos subsistemas de la envolvente del edificio, con descripción de su comportamiento frente a las acciones a las que está sometido (peso propio, viento, sismo, etc.), frente al fuego, seguridad de uso, evacuación de agua y comportamiento frente a la humedad, aislamiento acústico y sus bases de cálculo. - El Aislamiento térmico de dichos subsistemas, la demanda energética máxima prevista del edificio para condiciones de verano e invierno y su eficiencia energética en función del rendimiento energético de las instalaciones proyectado según el apartado 2.6.2.
2.4 Sistema de compartimentación	- Definición de los elementos de compartimentación con especificación de su comportamiento ante el fuego y su aislamiento acústico y otras características que sean exigibles, en su caso.
2.5 Sistemas de acabados	- Se indicarán las características y prescripciones de los acabados de los paramentos a fin de cumplir los requisitos de funcionalidad, seguridad y habitabilidad
2.6 Sistemas de acondicionamiento e instalaciones	- Se indicarán los datos de partida, los objetivos a cumplir, las prestaciones y las bases de cálculo para cada uno de los subsistemas siguientes: 1. Protección contra incendios, anti-intrusión, pararrayos, electricidad, alumbrado, ascensores, transporte, fontanería, evacuación de residuos líquidos y sólidos, ventilación, telecomunicaciones, etc. 2. Instalaciones térmicas del edificio proyectado y su rendimiento energético, suministro de combustibles, ahorro de energía e incorporación de energía solar térmica o fotovoltaica y otras energías renovables.
2.7 Equipamiento	- Definición de baños, cocinas y lavaderos, equipamiento industrial, etc.
3. Cumplimiento del CTE	Justificación de las prestaciones del edificio por requisitos básicos y en relación con las exigencias básicas del CTE. La justificación se realizará para las soluciones adoptadas conforme a lo indicado en el CTE. También se justificarán las prestaciones del edificio que mejoren los niveles exigidos en el CTE.
3.1 Seguridad Estructural	
3.2 Seguridad en caso de incendio*	
3.3 Seguridad de utilización	
3.4 Salubridad	
3.5 Protección contra el ruido	
3.6 Ahorro de energía	



Cumplimiento de otros reglamentos y disposiciones.

Justificación del cumplimiento de otros reglamentos obligatorios no realizada en el punto anterior, y justificación del cumplimiento de los requisitos básicos relativos a la funcionalidad de acuerdo con lo establecido en su normativa específica.

Anejos a la memoria

El proyecto contendrá tantos anejos como sean necesarios para la definición y justificación de las obras.

Información geotécnica
Cálculo de la estructura
Protección contra el incendio
Instalaciones del edificio
Eficiencia energética
Estudio de impacto ambiental
Plan de control de calidad
Estudio de Seguridad y Salud o Estudio Básico, en su caso

II. Planos

El proyecto contendrá tantos planos como sean necesarios para la definición en detalle de las obras.

En caso de obras de rehabilitación se incluirán planos del edificio antes de la intervención.

Plano de situación *

- Referido al planeamiento vigente, con referencia a puntos localizables y con indicación del norte geográfico

Plano de emplazamiento*

- Justificación urbanística, alineaciones, retranqueos, etc.

Plano de urbanización*

- Red viaria, acometidas, etc.

Plantas generales*

- Acotadas, con indicación de escala y de usos, reflejando los elementos fijos y los de mobiliario cuando sea preciso para la comprobación de la funcionalidad de los espacios.

Planos de cubiertas*

- Pendientes, puntos de recogida de aguas, etc.

Alzados y secciones*

- Acotados, con indicación de escala y cotas de altura de plantas, gruesos de forjado, alturas totales, para comprobar el cumplimiento de los requisitos urbanísticos y funcionales.

Planos de estructura

- Descripción gráfica y dimensional de todo del sistema estructural (cimentación, estructura portante y estructura horizontal). En los relativos a la cimentación se incluirá, además, su relación con el entorno inmediato y el conjunto de la obra.

Planos de instalaciones

- Descripción gráfica y dimensional de las redes de cada instalación, plantas, secciones y detalles.

Planos de definición constructiva

- Documentación gráfica de detalles constructivos.

Memorias gráficas

- Indicación de soluciones concretas y elementos singulares: carpintería, cerrajería, etc.

Otros

III. Pliego de condiciones

Pliego de cláusulas administrativas

Disposiciones generales

Disposiciones facultativas

Disposiciones económicas



2.7 Los proyectos de acústica

Por ser un campo de proyectos de reciente creación existen muchas dudas sobre la competencia de este tipo de proyectos, su estructura, su obligatoriedad, etc. En este apartado, esperamos resolver las dudas más generales que se plantean a la hora de empezar a realizar estos trabajos. Os animamos a preguntar en los foros las posibles dudas que os puedan quedar.

En primer lugar debemos dividir o separar en dos grupos los tipos de proyectos acústicos:

- proyectos para actividades calificadas.
- proyectos para edificaciones según CTE.

Como su nombre indica, este curso se centra en el segundo tipo de trabajo, aunque la documentación aportada y los temas tratados os permitirán acometer el otro tipo de trabajo.

a. Proyectos para actividades calificadas.

Los del primer grupo están controlados por la legislación local o regional en forma de Ordenanzas municipales, tal y como estudiareis en el caso práctico a realizar en esta UD, en el cual cada uno de vosotros tendrá que investigar sobre su legislación local.

La obligación o no de estos proyectos y su visado depende de la administración local o regional que debéis consultar en cada caso. Mi recomendación es realizar el visado pues refuerza y asegura nuestros documentos.

Como ejemplo os pongo el formato que debe tener según una de las legislaciones:

- Descripción de la actividad y horario previsto.
- Situación del local frente a viviendas u otros usos sensibles.
- Identificación y descripción de todos los elementos de originar ruido (maquinaria, megafonía, equipos de música, TV, puertas, Motores, y/o extractores, etc.)
- Plano en planta con ubicación de los elementos.
- Descripción del tipo de ruido : continuo, con presencia de tonos puros , aéreo , estructural , impulsivo ...
- Nivel máximo de presión sonora en dB(A) que justificadamente se prevea emita el local en su máxima actividad.
- Justificación técnica mediante medición y cálculos teóricos del aislamiento global a ruido aéreo del local antes de realizar las obras de aislamiento según Norma UNE EN ISO 717-1 y por bandas de octava según norma UNE EN ISO 140-4.
- Nombre y teléfono del titular, director de obra o encargado de la implantación de las medidas correctoras.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

- En función de los resultados obtenidos del aislamiento de partida, descripción pormenorizada de los trabajos a realizar.
- Cálculos justificativos teóricos del aislamiento acústico obtenido en las distintas dependencias del establecimiento.
- Sistemas correctores propuestos para eliminar el ruido en origen cuando sea posible o en la transmisión en su defecto., incluirá todas las medidas correctoras propuestas para tratar de eliminar las molestias por ruido incluyendo planos de aislamiento acústico y detalles de materiales, espesores y juntas.
- Justificación de los límites legislados de transmisión de ruido a viviendas, locales colindantes y/o próximos y al exterior
- Apartado específico sobre condiciones y recomendaciones de funcionamiento de la actividad en su caso descripción del limitador a instalar.

Una vez realizadas las obras de aislamiento acústico se exigirá con carácter previo al funcionamiento e inicio de la actividad

- La certificación técnica que acredite la ejecución conforme al proyecto.
- Informe técnico y valoración de las mediciones del aislamiento acústico real ofrecido por el local emisor conforme a la ordenanza.

Antes de realizar un proyecto de este tipo, se recomienda el estudio en profundidad de la legislación local y autonómica, pues los índices, límites y prestaciones requeridas pueden cambiar.

b. Proyectos para edificaciones.

En este caso, la mayoría de legislación local y regional cita a la NBE-CA o en su caso al nuevo CTE, por lo es necesario realizar una solución de aislamiento según estudiaremos en las UD's siguientes.

En este caso la realización del trabajo consistirá en un Proyecto parcial o documento adicional, q habitualmente, irá en conjunto con todos las demás justificaciones de los DB y formarán el proyecto de arquitectura. Por lo tanto, es obligatoria su realización, pero no "exclusiva" de los ingenieros de telecomunicación.

El contenido mínimo que debería llevar son las fichas justificativas. Aunque, los ejemplos presentados en el curso y nuestra recomendación es darle un carácter mayor y acompañarlo con una memoria descriptiva de las soluciones y hasta una justificación de los cálculos. En el punto siguiente trataremos la estructura de estos proyectos.

Dada su reciente publicación del DB-HR, es labor de todos los libre ejercientes de telecomunicaciones hacer ver a los arquitectos la necesidad de un proyecto con rigor y completo que sea realizado por técnico competente (nosotros) y visado por el colegio de telecomunicación. Será



importante que cuenten con vosotros para el control de obra, dada la gran responsabilidad de lo proyectado frente a lo instalado, tal y como veremos a lo largo del curso.

En la medida de vuestras posibilidades, es aconsejable que ofertéis realizar conjuntamente el proyecto de DB-HE de condiciones térmicas pues está totalmente ligado y relacionado con el acústico, pues también define materiales y soluciones constructivas. No sería adecuado, definir unos materiales aislantes térmicos en un proyecto y por otro lado una solución de aislamiento diferente.

Con respecto a la certificación final de obra, el CTE deja un poco "abierto" el tema de la obligatoriedad o no. Según los diferentes debates que hemos tenido con compañeros especialistas, se cree que las comunidades autónomas y los ayuntamientos tendrán la última palabra en este asunto. Por ejemplo en la comunidad valencia ya se obliga certificado, antes de la salida del CTE.

Nuestra opinión personal es que se terminará pidiendo de forma obligatoria en todos sitios, pues el nuevo CTE es una herramienta de fuerza para los consumidores/compradores de viviendas, que ya podrán denunciar firmemente cuando no se cumplan las especificaciones, cosa que era difícil de demostrar con la antigua NBE-CA.

Como ya estudiaremos y debatiremos en el T6, en el artículo del DB-HR que habla de la certificación indica que deberá ser realizado por **laboratorio acreditado** palabra que tendrá que definirse con mayor exactitud, pues puede comprender desde una acreditación ENAC (Nacional), hasta una acreditación ECA u OCA (local o regional).

2.8 Estructura del proyecto DB-HR

El proyecto es un conjunto de documentos cuyo objetivo es definir y valorar las características de las soluciones constructivas de aislamiento y acondicionamiento acústico para la protección frente al ruido.

El proyecto debe ser conciso, concreto y tener suficiente amplitud para que queden determinados todos los aspectos. El proyecto debe materializarse sin necesidad de solicitar al autor aclaraciones adicionales.

A continuación se propone una estructura y contenido para el proyecto de protección frente al ruido, aunque animo a todos realizar vuestras aportaciones y comentarios.

El proyecto de acústica en la edificación tiene la siguiente estructura:

- Memoria
- Planos (optativo)
- Pliego de condiciones
- Mediciones y presupuesto (optativo)

2.8.1 La memoria

La memoria describe el proyecto y justifica las soluciones adoptadas. En ella se presentan:

- Objetivos del proyecto
- Alternativas estudiadas y sus ventajas e inconvenientes.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

- Justificación de la solución adoptada.

La memoria debe ser comprensible, no sólo por profesionales especialistas sino por terceros, en particular por el cliente.

El contenido mínimo de la memoria es el siguiente:

- Objeto
- Alcance
- Antecedentes
- Requisitos de diseño
- Descripción de soluciones constructivas
- Resultados finales

2.8.2 Los planos

Los planos contienen la información gráfica para definir el diseño. Indicamos que puede ser optativo pues los planos pueden ir contenidos en el apartado del proyecto arquitectónico.

Dada la novedad de estos proyectos y de determinadas soluciones de construcción innovadoras nuestra recomendación es incluir planos detalle que describan y desglosen los componentes de la cada solución constructiva.

2.8.3 Pliego de condiciones

El pliego de condiciones establece las condiciones técnicas, económicas, administrativas y legales.

El contenido de este apartado debe estar particularizado según de los materiales acústicos utilizados y tendrá el siguiente contenido:

- Especificación de los materiales.
 - o Listados
 - o Calidades mínimas
- Reglamentación y normativa aplicable
- Aspectos contractuales

2.8.4 Mediciones y presupuesto

El objetivo del presupuesto es determinar el coste económico del proyecto. El presupuesto contiene la valoración económica global, desglosada y ordenada. Indicamos que puede ser optativo pues este presupuesto debe ir contenido en el apartado del proyecto arquitectónico, pues no es un sistema adicional a añadir a la edificación, como podría ser una ICT o una instalación solar térmica.

En los temas siguientes se tratarán los aspectos técnicos para el diseño y cálculo de soluciones de aislamiento y acondicionamiento que permitirán al alumno la creación de este tipo de proyectos. También se aportarán ejemplos de proyectos visados para que el alumno pueda desarrollar su proyecto tipo.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

2.9 Desarrollo del proyecto DB-HR

Es conocida por parte de muchos la oportunidad que ha abierto – a nivel de proyectos de acústica – el DB-HR estableciendo la obligatoriedad de llevar a cabo este tipo de instalaciones en un gran porcentaje de las obras de creación y rehabilitación de la mayoría de los edificios, y generando con ello la necesidad de realizar este tipo de proyectos de forma que acompañen y complementen los correspondientes proyectos arquitectónicos.

El proyecto de cumplimiento del DB-HR es el documento que contiene la información necesaria para conseguir una solución constructiva adecuada en un entorno determinado, cuya función será proteger a los habitantes de la edificación de los ruidos procedentes del exterior e interior de ésta.

Tal como se indicaba en la introducción a este curso, su objetivo es iniciar al alumno en el conocimiento de esta materia y, fundamentalmente, prepararle con los conocimientos y herramientas adecuados para permitir definir y justificar de forma adecuada mediante un proyecto técnico el diseño de soluciones constructivas de protección frente al ruido.

El desarrollo de este proyecto incluye las siguientes actividades:

- Recopilación y análisis de datos de partida y requisitos que justifican la realización del proyecto.
- Selección de las soluciones que mejor se adapten a nuestras necesidades, atendiendo a los criterios de obtención del mejor resultado y la mejor calidad, al menor coste.
- Construcción de la solución completa, incluyendo los cálculos realizados y los criterios utilizados para llegar a ella.
- Exposición de todos los detalles que componen esta solución, de forma que el documento del proyecto contenga toda la información necesaria para la ejecución del mismo, así como completar correctamente las fichas justificativas.

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA (T3)

PROYECTOS DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

Acústica Arquitectónica

Edición 2010-2011

Profesor: Juan M. Navarro

UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN ANTONIO DE MURCIA



Contenido

1. INTRODUCCIÓN	4
2. PROPAGACIÓN DEL SONIDO	5
2.1 Introducción	5
2.2 Reflexión del sonido.....	6
2.3 Coeficiente de absorción	7
2.4 Absorción del sonido en el medio físico	7
3. ATENUACIÓN DEL SONIDO.....	9
3.1 Propagación y atenuación del sonido en espacio libre	9
3.2 Propagación y atenuación del sonido en el interior de recintos	9
3.3 Tiempo de reverberación.....	12
3.4 Reducción de nivel sonoro mediante reducción de reverberación.....	13
4. MATERIALES PARA EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO Y AISLAMIENTO ACÚSTICO	14
4.1 Tipos de materiales acústicos	14
4.2 Parámetros característicos de los materiales acústicos.....	14
4.2.1 Materiales para aislamiento acústico	14
4.2.2 Materiales para acondicionamiento acústico	15
5. TÉCNICAS APLICADAS PARA EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO 23	
5.1 Teorías del acondicionamiento acústico.....	23
5.1.1 Teoría estadística.....	25
5.1.2 Teoría geométrica.	25
5.1.3 Teoría ondulatoria.	26
5.2 Conceptos y definiciones importantes.	26
5.3 Absorbentes sonoros.....	35
5.3.1 Materiales porosos	36
5.3.2 Resonadores de placa	39
5.3.3 Resonadores de agujero o de Helmholtz.....	40
5.4 Recomendaciones generales	41
6. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN EL DB-HR	42



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

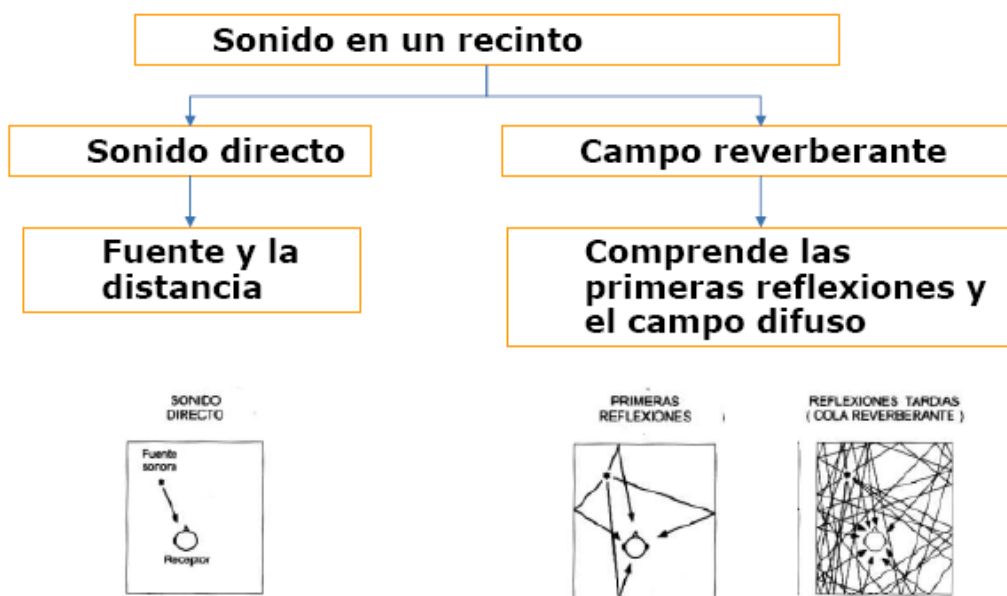
6.1 Exigencias de absorción acústica y T_r	42
6.2 Opciones de aplicación del diseño	45
6.3 Ejemplos prácticos de diseño	45
7. ENUNCIADO PROBLEMAS	46
7.1 Problema 1.....	46
7.2 Problema 2.....	46
7.3 Problema 3.....	46
7.4 Problema 4.....	47
8. SOLUCIONES PROBLEMAS	48
8.1 Problema 1.....	48
8.2 Problema 2.....	48
8.3 Problema 3.....	49
8.4 Problema 4.....	51



1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de esta unidad didáctica es describir las técnicas que debemos aplicar para el diseño de proyecto bajo el DB-HR con respecto al **Acondicionamiento Acústico**. Recordamos su definición como el estudio de las actuaciones para mejorar la calidad acústica en el interior de los recintos, supuestamente aislados del exterior, según su uso. Por lo tanto el objetivo es obtener la máxima calidad acústica.

El campo sonoro en un recinto está compuesto por el sonido directo y el sonido reverberante, tal y como estudiaremos en los apartados siguientes.



Para conseguir controlar el campo sonoro usaremos la absorción acústica mediante materiales y/u objetos que atenuarán el sonido en su camino de propagación cuando ocurran las reflexiones.

El parámetro más importante en la acústica de salas es el tiempo de reverberación, que depende del poder absorbente del recinto así como de su volumen. Por lo tanto, en el diseño de proyectos del DB-HR las exigencias irán dirigidas a reducir este tiempo de reverberación, aumentando la absorción de los recintos.



2. PROPAGACIÓN DEL SONIDO

2.1 Introducción

Normalmente se entiende como sonido solamente el que se propaga en gases, especialmente en el aire.

Evidentemente, también es posible la propagación de sonidos en los líquidos y en los sólidos.

Como la propagación en gases y en líquidos obedece a las mismas leyes físicas, se pueden estudiar conjuntamente, y luego, por separado, la propagación en sólidos.

a) *En gases y líquidos.*

Aquí, la propagación del sonido no puede ser objeto de tensiones transversales, y las ondas sonoras son ondas de densidad con movimiento longitudinal. Esta propagación se puede caracterizar con dos magnitudes: la presión sonora, p , (contracciones y dilataciones de volumen: variación de densidad), y la velocidad del sonido, c (movimiento).

Estas ondas **longitudinales** se propagan fundamentalmente de dos formas:

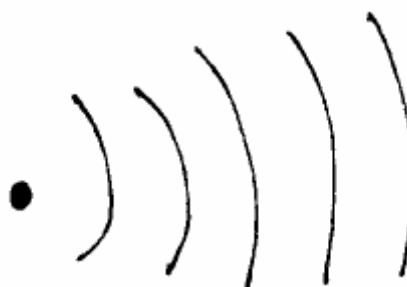
- Ondas planas progresivas (pistón indeformable).

Fuente muy alejada



- Ondas esféricas (esfera radiante).

Fuente próxima





Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

b) En sólidos.

En este caso, además de las ondas longitudinales, el sonido también se puede propagar mediante ondas transversales. La propagación mediante unos tipos u otros de ondas depende, en parte, de la geometría del cuerpo sólido considerado.

Existen varios tipos de ondas según tengan componente longitudinal, transversal o ambos.

- Longitudinales: Ondas de densidad.
- Transversales: Ondas transversales y ondas de torsión.
- Longitudinales-transversales: Ondas de alargamiento, ondas superficiales o de Rayleigh y ondas de flexión.

Las más importantes desde el punto de vista de aislamiento acústico son las **ondas de flexión**.

La particularidad de este tipo de ondas es que su velocidad de propagación «c», al contrario que en los otros tipos de ondas, no es constante, sino que es proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia

$$c = \sqrt{\omega} \sqrt[4]{B/M}$$

Donde: M=masa superficial

B=rigidez a la flexión

Con este tipo de ondas, se produce una dispersión espacio-temporal de las diversas longitudes de onda a su paso por el sólido; es decir, que en la propagación de un impulso con un amplio espectro de frecuencias llegan primero las altas frecuencias a un punto alejado del sólido. Esta propagación es la usada por sonidos o ruidos de vibración o de impacto cuya afección y problemática estudiaremos en unidades siguientes.

2.2 Reflexión del sonido

El sonido durante el proceso de propagación se encuentra con obstáculos, o cambios de medio, donde se produce el fenómeno de la reflexión y la transmisión sonora.

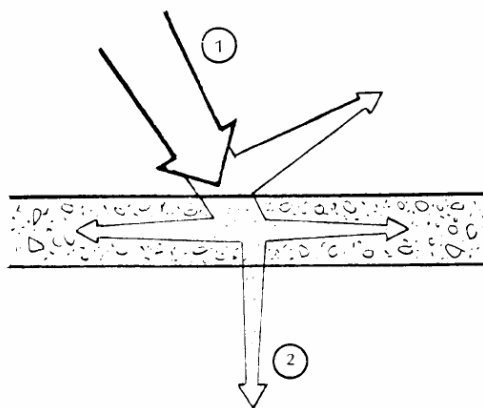


Figura 3.1. Evolución de una onda acústica en el proceso de transmisión entre medios.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

En la figura anterior aparecen dos medios 1 y 2 cuyas impedancias son, respectivamente, Z_1 y Z_2 . Consideramos una onda incidente «i» que va del medio 1 al 2. Al llegar al límite, parte de la energía sonora se refleja mediante una onda reflejada «r», y otra parte se transmite al medio 2 mediante una onda transmitida «t».

Se define:

Factor (o coeficiente) de transmisión en la dirección normal: $\tau = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$

Factor (o coeficiente) de reflexión en la dirección normal: $\rho = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$

Esta última ecuación nos indica que cuanto mayor sea la diferencia entre Z_1 y Z_2 , la reflexión será mayor y, por tanto, existirá una elevada amortiguación del sonido. Por ejemplo: si Z_1 es pequeño, como en el caso del aire, se elegirá para una buena amortiguación un Z_2 grande; por el contrario, si Z_1 es grande, como en el caso del agua y de los sólidos, se elegirá una materia de impedancia Z_2 pequeña.

2.3 Coeficiente de absorción

Generalmente, en lugar del factor de reflexión (ρ), se emplea el coeficiente de absorción (α), que se define como la fracción de energía de onda incidente que no es reflejada. Como vimos anteriormente, la energía es proporcional al cuadrado de la presión sonora; entonces podemos escribir:

$$\alpha = 1 - \rho^2$$

Para hacerse una idea, veamos un ejemplo: el grado de absorción de paredes sin revestir, empleando materiales de construcción usuales, es, en general, menor del 5% ($\alpha < 0,05$) (imaginarse una habitación vacía). Además, si tenemos presente que con un grado de absorción del 10% ($\alpha = 0,1$) son necesarias más de 20 reflexiones para que la energía de una señal sonora se reduzca en unos 10 dB; es decir, a una décima parte, está claro que la naturaleza de las paredes juega un papel decisivo en la intensidad del interior de un recinto.

2.4 Absorción del sonido en el medio físico

La propagación del sonido no se realiza nunca sin pérdidas, sino que está supeditada siempre a una mayor o menor amortiguación; es decir, la presión o la velocidad disminuyen al aumentar la distancia al foco sonoro.

Para esta amortiguación existen diferentes causas que dependen de las características del medio físico y de la frecuencia del sonido.

Amortiguación «clásica», que incluye:

- Efecto de roce interno de las partículas excitadas por la vibración, condicionado a la viscosidad del medio.



- Efecto de la transmisión del calor generado por el roce de las partículas, dependiente de los coeficientes de transmisión.
- Amortiguación por relajación molecular térmica, debido a las necesidades de energía para el retorno a la posición de equilibrio de las partículas excitadas por las vibraciones. Esta amortiguación es complementaria a la «clásica».

Por ser el aire el medio de propagación habitual, podemos decir que la amortiguación en dicho medio depende de la frecuencia del sonido considerado, de la humedad relativa y de la temperatura. Los sonidos de alta frecuencia son amortiguados en mayor medida que los de baja frecuencia. Por otra parte, la humedad relativa influye de manera importante en la amortiguación. En la figura 2 puede verse cómo influye la humedad relativa en la amortiguación y para diferentes frecuencias. El máximo de amortiguación se obtiene para un aire muy seco.

También como se ha indicado, influye la temperatura en la amortiguación, disminuyendo ésta al aumentar la temperatura para cualquier grado de humedad (especialmente a partir de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para arriba).

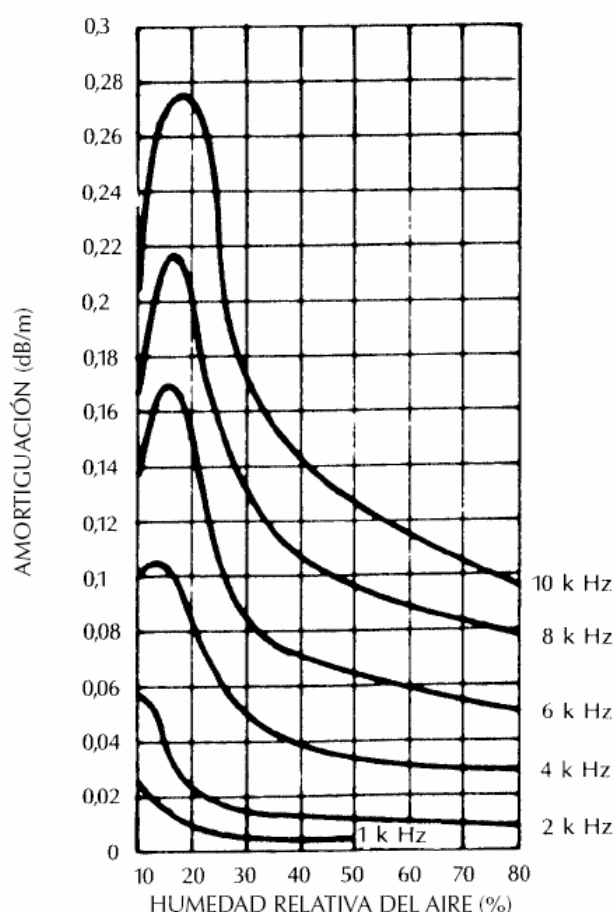


Figura 3.2. Influencia de la humedad relativa en la amortiguación y para diferentes frecuencias.



3. ATENUACIÓN DEL SONIDO

En la atenuación del sonido se incluyen todas las medidas con el ruido, cuya eficacia descansa perfectamente en la absorción del sonido. Entre éstas se encuentran fundamentalmente las encaminadas a reducir el ruido en el mismo local de emisión, y a mejorar la calidad de escucha de una sala.

3.1 Propagación y atenuación del sonido en espacio libre

Si consideramos una fuente de sonido en espacio libre, a medida que nos alejamos de la misma se produce una disminución de la presión sonora inversamente proporcional a la distancia. Pero este efecto no debe considerarse en principio como una amortiguación del sonido en sí, sino más bien como una disminución de la amplitud originada por la distribución de la energía en un volumen mayor.

La expresión general del nivel de presión sonora a una distancia r de la fuente, viene dada por:

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{\phi}{4\pi r^2}$$

donde:

L_p - Nivel de presión acústica a distancia de la fuente (dB).

L_w - Nivel de potencia acústica de la fuente (dB).

r - Distancia de la fuente (m).

ϕ - Directividad de la fuente emisora, que depende del ángulo sólido de emisión. En la acústica arquitectónica, se suele considerar fuente omnidireccional ($\phi=1$).

Considerando una fuente puntual omnidireccional (radiación esférica), el nivel de presión a una distancia de la fuente r viene determinado por la siguiente relación:

$$L_p = L_w - 10 \log 4\pi r^2$$

En la Fig. 4 se observa la representación gráfica de esta ecuación, que indica una caída de 6 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente.

3.2 Propagación y atenuación del sonido en el interior de recintos

En un recinto o local cerrado, las ondas emitidas por una fuente determinada chocan con las superficies que limitan el local, dando origen a ondas reflejadas, las cuales a su vez se reflejan nuevamente, repitiéndose el fenómeno multitud de veces.

La presión acústica que existe en un punto determinado del recinto, después de haberse producido varias reflexiones del sonido, es la resultante de las presiones de las ondas emitidas en distintos momentos y que en el instante de la observación se cruzan en el punto considerado. Dicho de otro modo, la presión en dicho punto es el resultado de la presión del campo directo (ondas que



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

se han propagado desde la fuente sin chocar) y del campo reverberado (ondas que han chocado una o varias veces contra las superficies que limitan el local), como se indica en la Fig. 3.

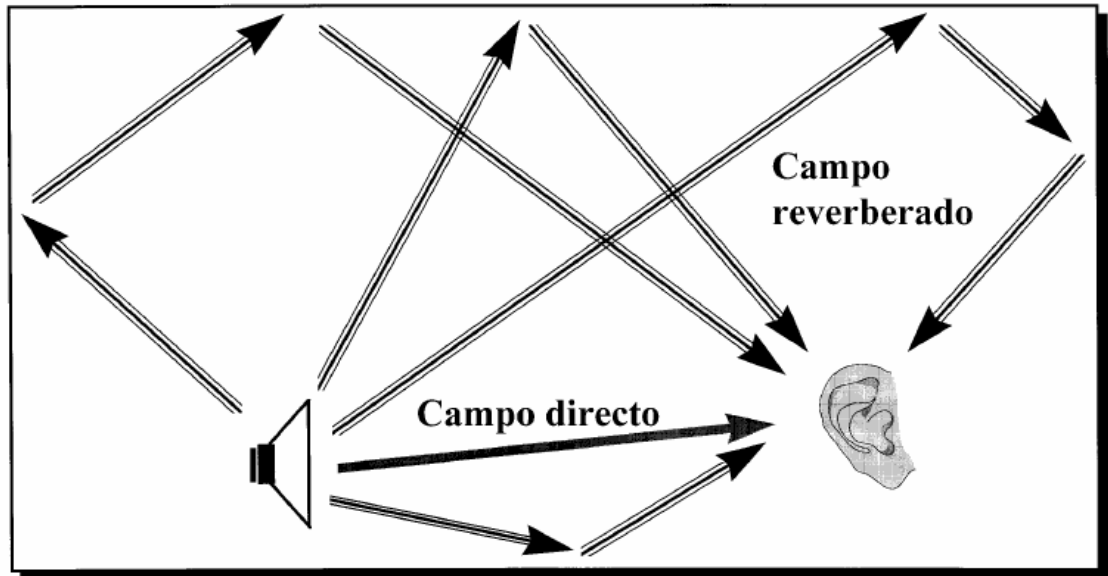


Figura 3.3. Recorridos de las ondas acústicas (rayos) en el interior de un recinto.

Por tanto, el nivel de presión acústica en un punto, depende en gran medida de la absorción acústica de las superficies que limitan el local y que en definitiva definen la absorción global del mismo o área absorbente del local.

Considerando una fuente de propagación omnidireccional, el nivel de presión sonora en un punto viene dado por la expresión:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$\text{Donde: } R = \frac{S_T \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \text{ y } \bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}.$$

y donde:

L_p - Nivel de presión en el punto considerado (dB).

L_w - Nivel de potencia acústica de la fuente (dB).

r - Distancia del punto considerado a la fuente (m).

R - Constante del local (m^2).

Es habitual usar para locales poco absorbentes la constante del local se aproxima por el Área de absorción del local $R=A = S_T \bar{\alpha}$.

S_T - Suma de las superficies que limitan el local (m^2).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

$\bar{\alpha}$ - Coeficientes de absorción medio, de las superficies que limitan el local.

$S_1, S_2 \dots S_n$ - Areas de las diferentes superficies que limitan el local (m^2).

$\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_n$ - Coeficiente de absorción de dichas superficies que limitan el local.

El término $4/R$ o $4/A$ define la reducción del nivel de presión acústica, en el campo reverberado y que lógicamente será función del área absorbente del local.

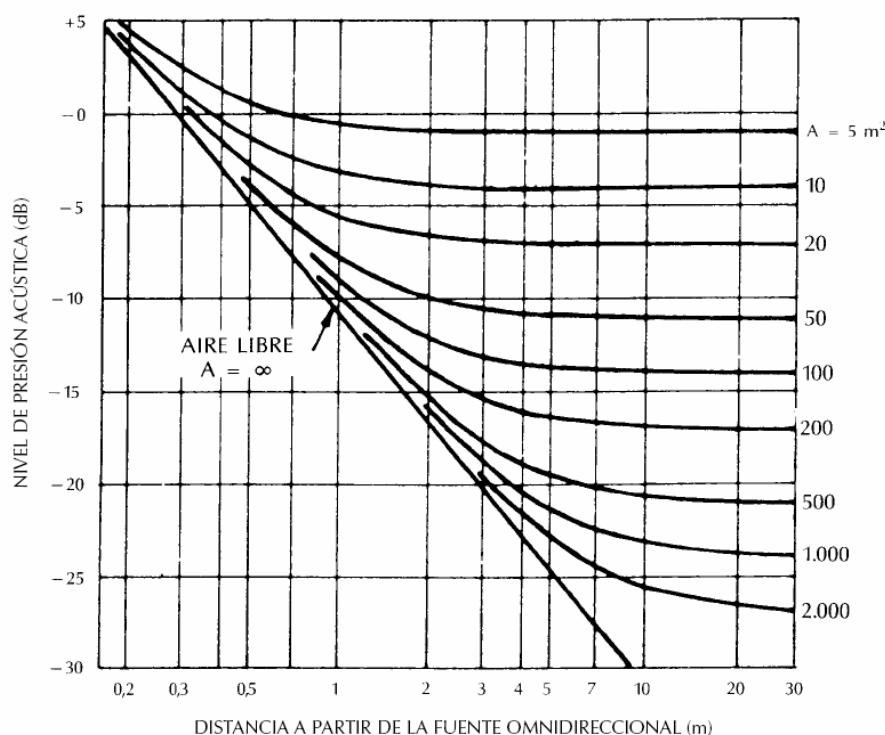


Figura 3.4. Variaciones de nivel de presión con la distancia y para diferentes áreas de absorción del local.

En la gráfica de la Fig. 4 se representa las variaciones de nivel de presión con la distancia y para diferentes áreas de absorción del local; considerando una fuente omnidireccional.

Para distancias mayores a $r_c = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{A}{\pi}}$ (radio crítico), se mantiene constante la presión

sonora. No obstante, puede observarse que aún para valores de $r > r_c$, en muchos casos permanece una ligera disminución de nivel, debido a que un campo difuso se cumple raras veces y por otra parte la mayoría de los focos no emiten ondas esféricas perfectas. No obstante, debe considerarse el ábaco como un límite práctico de cálculo.

La reducción media de la presión sonora en el campo reverberado, en un recinto donde se aplican materiales absorbentes de sonido; viene dado por la relación:

$$\Delta L_p = 10 \log \frac{A_1}{A_0}$$



Donde:

ΔL_p - Reducción de la presión sonora (dB).

A_1 - Área absorbente del local, con el tratamiento de materiales absorbentes (m^2).

A_0 - Área absorbente del local antes del tratamiento (m^2).

3.3 Tiempo de reverberación

El cálculo de esta reducción de la presión sonora puede obtenerse igualmente, partiendo de los tiempos de reverberación antes y después de la aplicación de los materiales absorbentes, según la relación:

$$\Delta L_p = 10 \log \frac{T_0}{T_1}$$

Donde:

T_0 - Tiempo de reverberación antes del tratamiento (s).

T_1 - Tiempo de reverberación después del tratamiento (s).

El tiempo de reverberación se define como el tiempo durante el cual la energía sonora en el recinto se reduce a una millonésima del valor inicial o, dicho de otro modo, 60 dB; después de cesar la fuente de ruido.

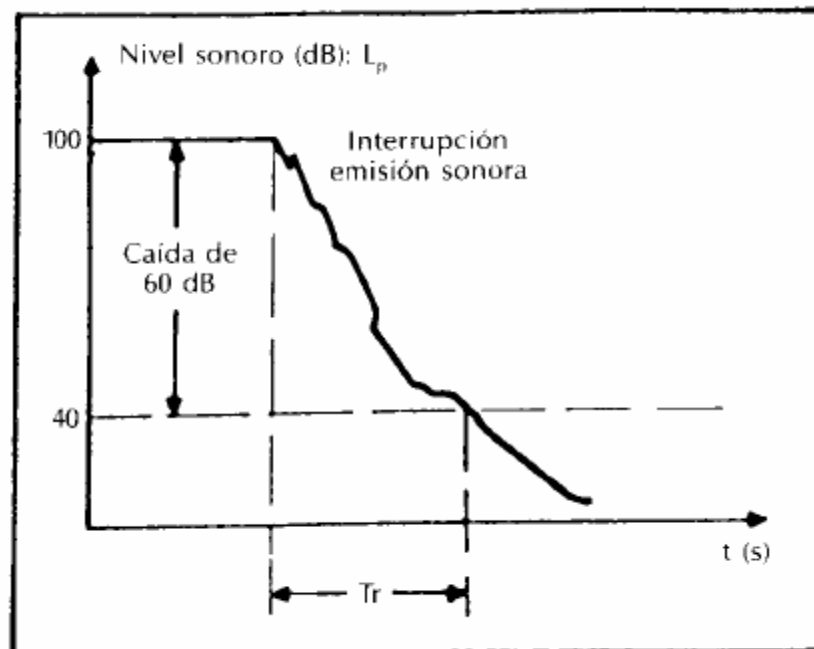


Figura 3.5. Representación de la disminución de energía sonora en un recinto y definición de tiempo de reverberación.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Dicho tiempo de reverberación puede medirse con los aparatos adecuados o bien calcularse empíricamente con una cierta aproximación.

La fórmula más utilizada para el cálculo es la aplicación de la ecuación de **Sabine**:

$$Tr = \frac{0,162.V}{A}$$

Donde:

Tr - Tiempo de reverberación (seg).

V - Volumen del recinto (m³).

A - Area absorbente del local (m²).

Esta ecuación es aplicable, especialmente en recintos no muy grandes, donde las superficies que los limitan posean un coeficiente de absorción uniforme y cuyo coeficiente de absorción medio no sea superior a 0,2.

Para valores del coeficiente de absorción superior y siempre que exista una cierta uniformidad entre los mismos, es más conveniente la utilización de la ecuación de Eyring:

$$Tr = \frac{0,162.V}{-S_T \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

3.4 Reducción de nivel sonoro mediante reducción de reverberación

Ciertos locales pueden ser foco de un ruido de nivel sonoro elevado si no se toman precauciones. Este es el caso de muchos locales industriales, donde son corrientes los niveles peligrosos para la conservación de la agudeza auditiva. Esto ocurre también, aunque con una intensidad menor, en los locales que acogen público como cafés, restaurantes, grandes oficinas, salas de espera de estaciones o aeropuertos, etc. Como en la mayor parte de los casos de acústica, es en el momento de la concepción de las salas, recintos, etc., cuando hay que pensar en el problema del ruido, y no cuando ya está construido el local.

Para la disminución del ruido se puede recurrir, según los casos, a dos procedimientos:

- Reducir la potencia sonora emitida mediante recursos constructivos, es decir, mediante blindajes adecuados en las máquinas, o, si esto no es posible, mediante apantallados parciales, móviles o no.
- En el caso de no poderse realizar las medidas anteriores (gimnasios, piscinas cubiertas, restaurantes, etc.), sólo queda la posibilidad de reducir el nivel sonoro mediante el aumento del área de absorción equivalente o, lo que es lo mismo, mediante la reducción del tiempo de reverberación.

La eficacia conseguida en la reducción de nivel se puede calcular con la expresión indicada anteriormente:

$$\Delta L_p = 10 \log \frac{A_1}{A_0}$$



Donde:

ΔL_p - Reducción de la presión sonora (dB).

A_1 - Área absorbente del local, con el tratamiento de materiales absorbentes (m^2).

A_0 - Área absorbente del local antes del tratamiento (m^2).

4. MATERIALES PARA EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO Y AISLAMIENTO ACÚSTICO

4.1 Tipos de materiales acústicos

Los materiales y estructuras para tratamiento acústico, se pueden describir como aquellos que tienen la propiedad de absorber o reflejar una parte importante de la energía de las ondas sonoras que chocan contra ellos. Pueden emplearse para aislar y para acondicionar acústicamente, de diferentes maneras, como:

1. Estructuras para reducir la transmisión sonora.
2. Elementos para barreras y cerramientos.
3. Unidades suspendidas individuales.
4. Recubrimientos de paredes suelos y techos.

Dependiendo de su objetivo existen diferentes tipos de materiales acústicos:

- Materiales absorbentes: Absorben la energía acústica de las ondas que inciden en su superficie transformándola en calor, y reduciendo la energía acumulada en el recinto.
- Materiales aislantes: Impiden la propagación del sonido de un recinto a otro.
- Materiales difusores: Contribuyen a lograr un campo sonoro más difuso en el recinto.

4.2 Parámetros característicos de los materiales acústicos

4.2.1 Materiales para aislamiento acústico

El aislamiento acústico consiste en impedir la propagación de una señal sonora a través del aire, mediante diferentes obstáculos reflectores, para lo que son necesarias paredes duras y pesadas, que reflejan el sonido, pero no lo absorben. También se puede realizar el **amortiguamiento** del sonido, mediante la absorción del mismo. Es difícil en la realidad conseguir una estructura que refleje todo el sonido, sin que absorba una parte del mismo. La pérdida por transmisión PT indica la capacidad de una pared para atenuar las ondas.

Cuando una onda sonora choca contra una pared, una parte de la energía que transporta la onda se transmite a través de la pared (figura 3.1), y otra parte se refleja. La capacidad que tiene una pared para impedir que el sonido se transmita a través de ella, se da mediante su aislamiento acústico normalizado R, dado en dB a las frecuencias de 125, 250, 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz, que nos informa sobre el aislamiento acústico que presenta esa pared entre dos recintos adyacentes.



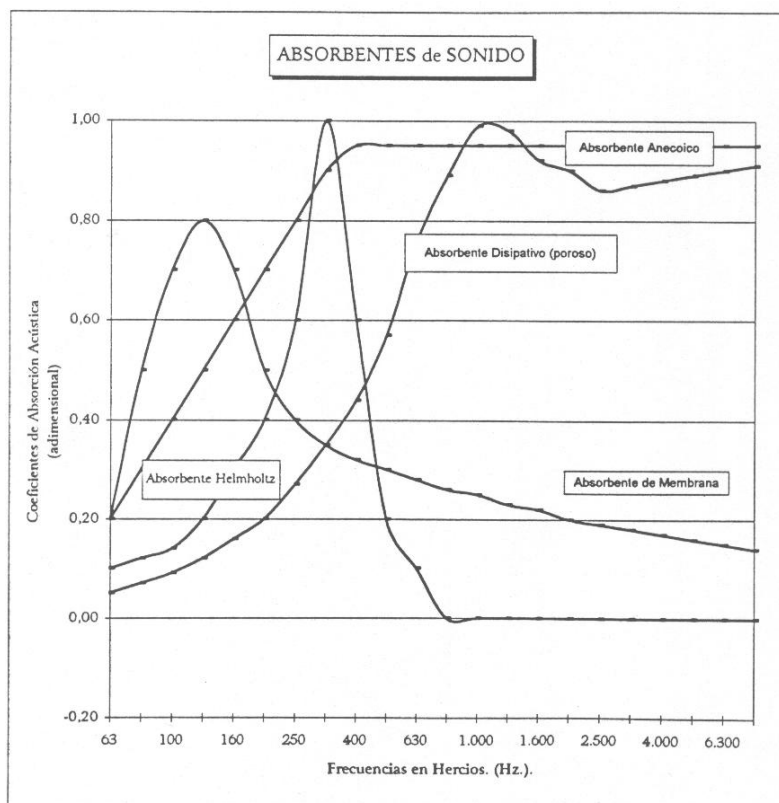
4.2.2 Materiales para acondicionamiento acústico

Los materiales acústicos se emplean también como superficie de acabado de diferentes tipos de construcciones, con el fin de satisfacer unas determinadas condiciones.

$$\alpha = \frac{E_{abs}}{E_i}$$

Energía Reflejada:
 $E_r = E_i(1 - \alpha)$

Algunas de las propiedades que merecen consideración, además de la absorción sonora, son el efecto decorativo, reflectividad lumínica, mantenimiento, duración, resistencia al fuego, etc. Las pérdidas de energía en los materiales se pueden caracterizar mediante el coeficiente de absorción sonora α , entendiéndose por tal a la relación entre la energía sonora absorbida por un material y la energía sonora incidente sobre dicho material, por unidad de superficie y que puede variar desde un 1 o 2 % al 100 %, para diferentes materiales. El coeficiente de absorción sonora de un material depende de la naturaleza del mismo, de la frecuencia de la onda sonora y del ángulo con el que la onda incide sobre la superficie. Ya que el coeficiente de absorción varía con la frecuencia, se suelen dar los mismos a las frecuencias de 125, 250, 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz.

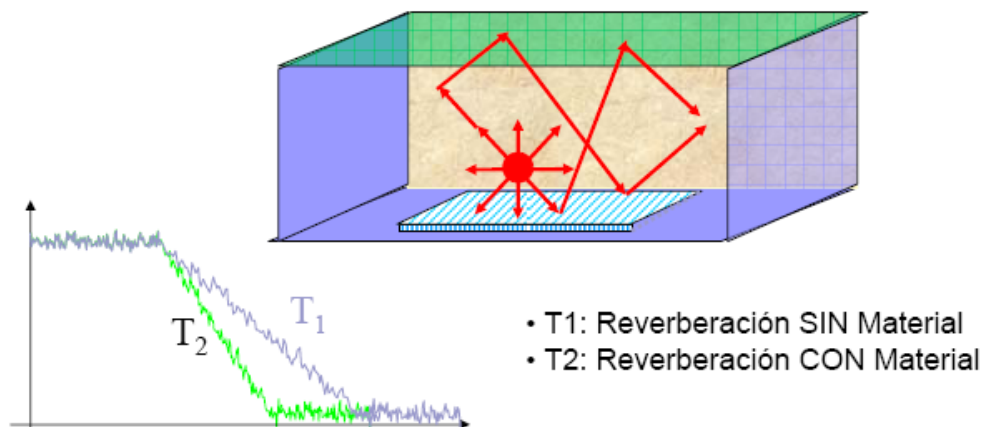




Los materiales de acabado de interiores, tales como hormigón, yeso, vidrio, mampostería, terrazo, etc., son lo suficientemente rígidos y no porosos como para ser **muy reflectantes**, con unos coeficientes de absorción inferiores a 0.05, sobre todo a las bajas frecuencias.

Las alfombras y cortinas proporcionan una buena absorción, en virtud de su porosidad. La absorción de las alfombras depende de un cierto número de factores, que incluyen altura de pelo, peso, tipo de apoyo, espesor y material del forro. En la mayoría de las alfombras, la absorción crece con la frecuencia, alcanzando valores elevados en la zona de las altas frecuencias. La absorción de las cortinas varía ampliamente, dependiendo de su peso y de la cantidad de pliegues. La absorción se incrementa especialmente a las bajas frecuencias, separando las cortinas, algunos centímetros desde la pared. El mobiliario así como las personas pueden añadir un incremento en la absorción en un local.

El coeficiente de absorción de cualquier material, varía considerablemente con el ángulo de incidencia de las ondas. Cuando los materiales se emplean para recubrir las superficies de un recinto, están expuestos normalmente a las ondas sonoras que inciden bajo diferentes ángulos aleatoriamente distribuidos. Como consecuencia de esto, los coeficientes de absorción sonora comerciales se determinan por el método de la cámara reverberante. Este es básicamente un método de integración, en el que las ondas chocan con la muestra de ensayo simultáneamente desde diferentes direcciones. El coeficiente se calcula a partir del efecto medio de la muestra en el campo sonoro de la cámara, considerando el resultado como un valor medio para todos los ángulos de incidencia.



Este coeficiente se llama de Sabine α_s , para distinguirlo del coeficiente de incidencia normal o de Kundt α_{90} , que se aplica al caso de ondas que chocan perpendicularmente con la superficie y que se mide por el método de Kundt.

No existe una relación fija o exacta entre el coeficiente de incidencia normal o de Kundt y el de incidencia aleatoria o de Sabine para los diversos materiales. Es decir, dos materiales que tengan el mismo coeficiente de incidencia normal, no tienen porque tener el mismo coeficiente de incidencia aleatoria. El coeficiente de absorción Sabine, tiene un valor superior al coeficiente de Kundt. Para



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

materiales muy absorbentes el valor de α_s puede exceder a la unidad hasta en un 20 o 30 %, como consecuencia de las técnicas de medida empleadas en su cálculo.

Si en el interior de un local existen diferentes objetos y personas, para encontrar la absorción total de un número de objetos del mismo tipo, se multiplica la absorción equivalente de un objeto por el número total de objetos en el recinto. Se define como absorción equivalente de un objeto, a la absorción total de un metro cuadrado de superficie, cuyo coeficiente de absorción es numéricamente igual a la absorción producida por un objeto.

El coeficiente de reducción de sonido (α_m o α_w según el DB-HR) es el promedio de la absorción a 500, 1.000 y 2.000 Hz.

Un elemento que interviene en la absorción sonora, principalmente en el campo de las bajas frecuencias, es el espesor del volumen de aire existente entre la cara del material y la superficie rígida que lo soporta. Este volumen puede variar en la práctica desde cero cuando el material se monta directamente sobre el soporte rígido, hasta algunos metros como en el caso de los techos acústicos suspendidos. Es necesaria una anchura de al menos 10 cm para mantener una alta absorción a las bajas frecuencias (figura 6).

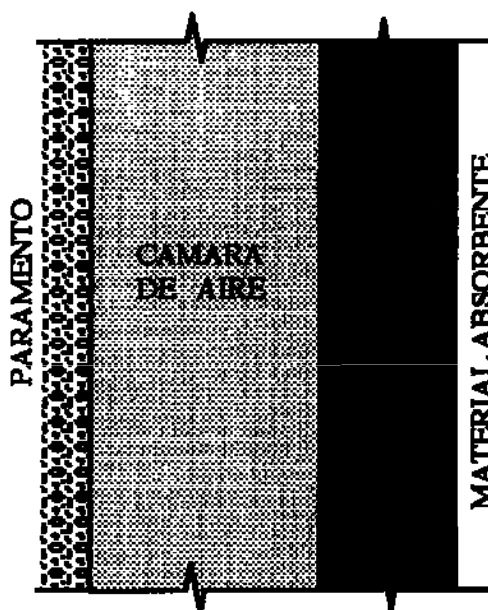


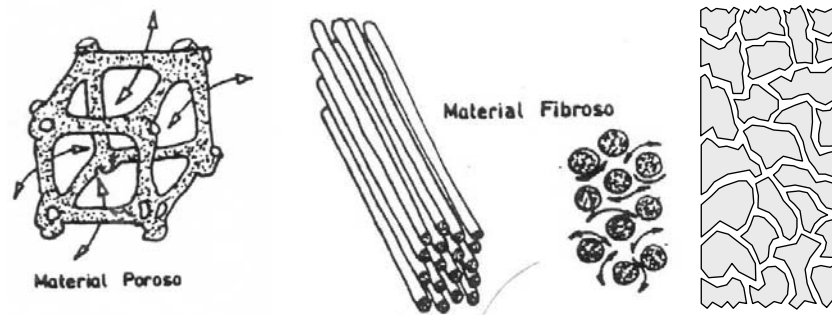
Figura 3.6. Detalle de colocación de un material con una cámara de aire.

En general, los materiales acústicos, presentan una curva de absorción en función de la frecuencia en forma de campana, con un pico más o menos agudo en función de la anchura de volumen de aire. Los materiales acústicos comerciales utilizados para recubrir superficies de paredes y techos, se pueden clasificar de diferentes formas, dependiendo de las propiedades físicas y estructurales que se consideren (figura 7), pudiendo exponerse unas ideas generales sobre los siguientes tipos:

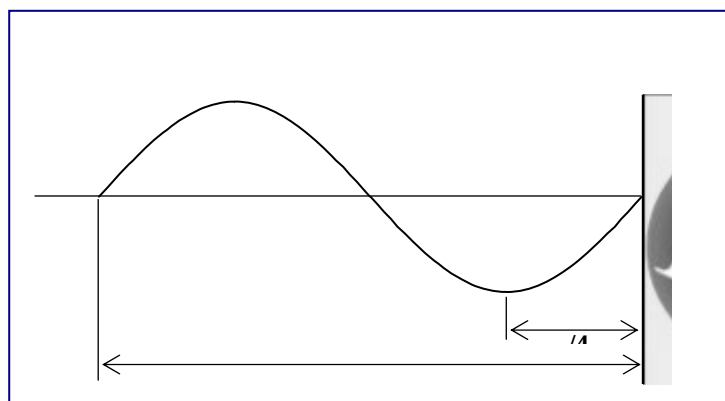


- a) **Materiales porosos**, son de estructura granular o fibrosa, siendo importante el espesor de la capa y la distancia entre ésta y la pared. El espesor del material se elige de acuerdo con el valor del coeficiente de absorción deseado, ya que si es demasiado delgado se reduce el coeficiente de absorción a las bajas frecuencias, mientras que si es muy grueso resulta más caro.

En la práctica, el empleo de materiales fibrosos absorbentes, se asocia a varias cubiertas perforadas que pueden ser de madera contrachapada, cartón, yeso, etc. Suelen presentarse en forma de paneles y tableros acústicos de fácil adaptación e instalación, tanto en nuevas construcciones, como en edificios ya existentes. La mayoría de estos materiales pueden colocarse como un techo suspendido por medio de elementos metálicos, debiendo cuidarse el problema de las humedades, que pueden originar la flexión de los mismos. Estos sistemas permiten la combinación de techos absorbentes, con la iluminación y el aire acondicionado en cualquier disposición deseada, permitiendo un fácil acceso al espacio superior.



Existe una influencia en la distancia de montaje entre la pared y el material, o en todo caso el espesor del elemento. Está relacionado con la velocidad de las moléculas de aire en una onda sonora senoidal en función de la distancia a la pared, a mayor velocidad mayor es la energía absorbida.



Según la figura anterior, la máxima velocidad y absorción ocurre cuando la distancia sea igual a $\lambda/4$. A partir de esa frecuencia, el material empieza a absorber todas las frecuencias superiores aumentando la absorción conforme aumenta la frecuencia. Para las frecuencias bajas no es práctico



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

abarcar varios máximos dado la longitud de onda tan grande λ tienen. Por ejemplo, para absorber $f > 250 \text{ Hz}$; $\lambda_{\text{max}} = 1,4 \text{ m}$ por lo que necesitamos una distancia o espesor $> 35 \text{ cm}$.

En un panel acústico, el incremento de su espesor, aumenta la absorción principalmente a las frecuencias de 250, 500 y 1.000 Hz, con un efecto prácticamente despreciable fuera de este rango. Si se monta este material dejando un espacio de aire, entre el mismo y la pared, aumenta la absorción a 250 Hz y algo a 125 Hz. Existe también una disminución característica de absorción a 500 Hz en todos los montajes con espacio de aire, pero no existe o es muy pequeño el cambio a frecuencias más altas. La mayoría de los materiales presentan cambios insignificantes en la absorción a medida que el espacio de aire se incrementa de 20 a 40 cm.

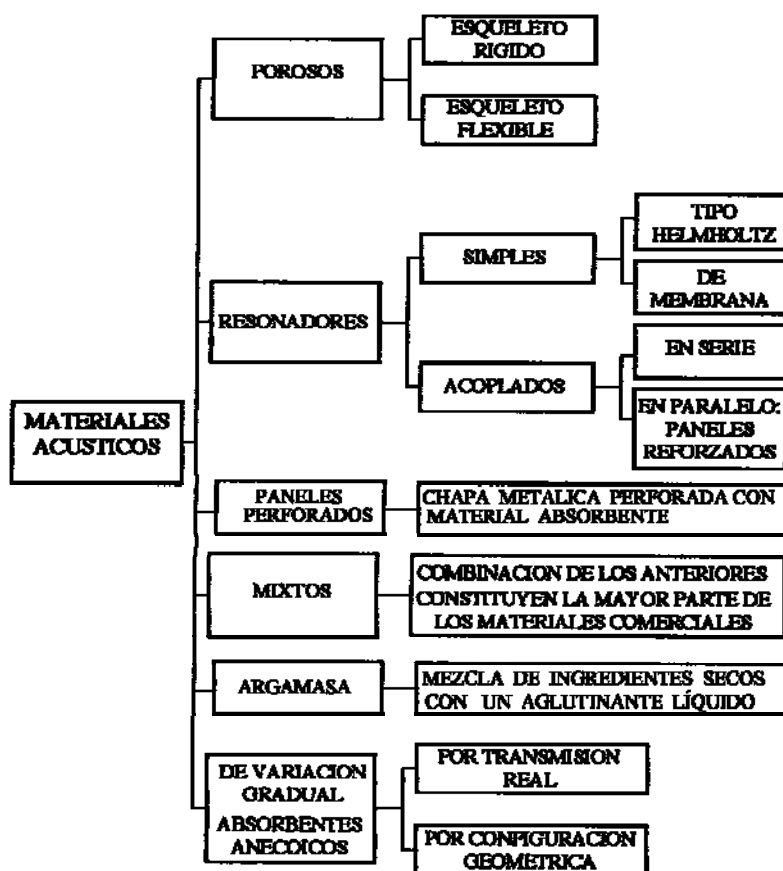


Figura 3.7. Esquema de los materiales absorbentes.

La mayoría de los paneles acústicos empleados para acondicionamiento acústico, tienen una alta reflectancia lumínica del orden de 0,7 a 0,8. Para mantener la reflectancia lumínica próxima a su valor inicial, se puede hacer mediante lavado normalizado o repintado, tan frecuentemente como sea necesario, sin dañar las características de absorción del material consultando al fabricante con respecto a las pinturas recomendadas y las técnicas de aplicación. Algunos materiales se suministran con acabados de pintura lavables, aplicados en fábrica, otros materiales se presentan con una membrana decorativa superficial, por lo que son más fáciles de mantenimiento. Las losetas se pintan con pinturas que no cubren los poros, como pueden ser soluciones de agua coloreadas. Las

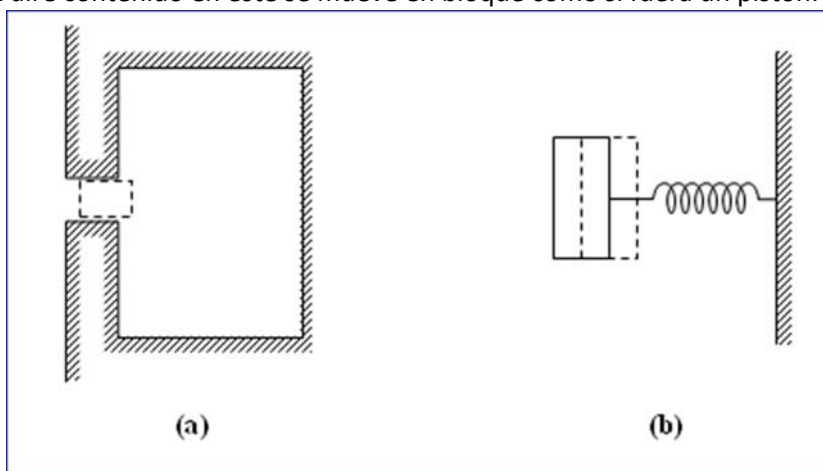


Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

propiedades de resistencia al fuego de los materiales acústicos, son un aspecto importante en muchos casos, debiendo cumplir la legislación sobre este tema.

- b) **Materiales para argamasa**, son materiales acústicos que se aplican en estado húmedo con paleta o pistola para formar superficies continuas de un espesor deseado. Estos materiales están compuestos de una mezcla de ingredientes secos, a los cuales se les añade un aglutinante líquido. Los morteros se aplican normalmente a una capa de cemento o sobre cualquier otro material. La aplicación puede ser en dos o más capas, empleando métodos normales de fratasado, aunque se está utilizando cada vez más el método a pistola. Su funcionamiento es similar al absorbente poroso.
- c) **Resonadores de Helmholtz**. Volumen semicerrado que se comunica con el ambiente acústico por medio de un pequeño conducto. Si la longitud de onda es mucho mayor que la longitud del conducto, el aire contenido en éste se mueve en bloque como si fuera un pistón.



Siendo el volumen de ésta es **V**, la sección del cuello es **A** y su longitud es longitud es **l**, podemos enunciar una formula teórica de su frecuencia de resonancia para su diseño y saber en que frecuencia absorben con mayor eficacia.

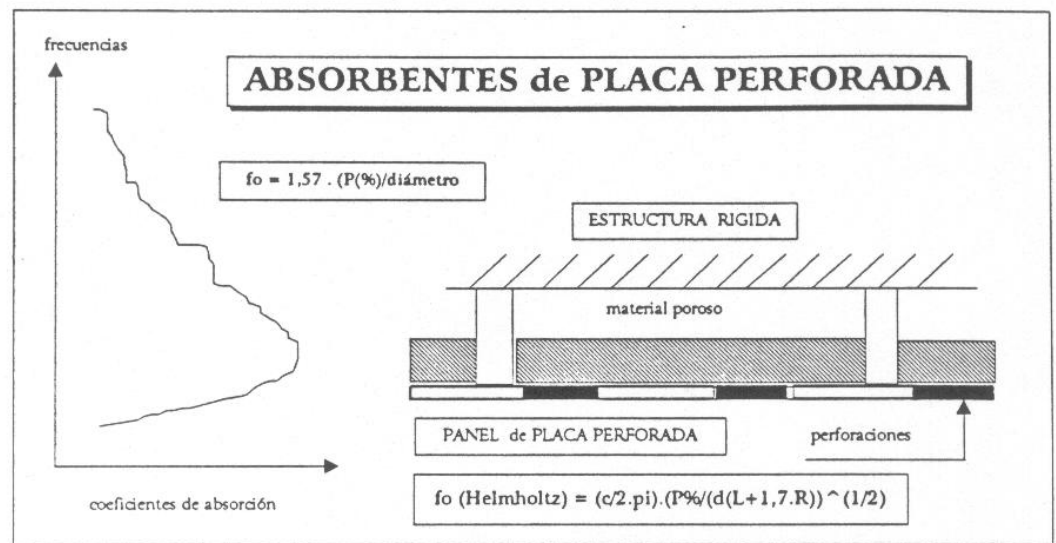
$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V \cdot l}} \cong 55 \sqrt{\frac{A}{V \cdot l}}$$

Por ejemplo se pueden construir con **Sistemas de paneles metálicos perforados**, son de aluminio o chapa perforada, con un relleno de fibra mineral, siendo este relleno el elemento absorbente, de unos 3 cm de espesor con un sistema ignífugo. El relleno se coloca en el panel durante la instalación y se mantiene separado del mismo con una rejilla, con el fin de facilitar las operaciones de limpieza, conservando su absorción. El acabado de estos materiales es en esmaltes de alta calidad, que facilitan un lavado frecuente. Su aplicación más general es como techos acústicos suspendidos, por su facilidad de montaje y de coordinación con los sistemas aire/luz. Todos estos materiales, tienen un alto rendimiento como absorbentes, variando sus valores en función de la forma de perforación, de la densidad y espesor del elemento absorbente, así como el espacio de aire existente detrás de él.

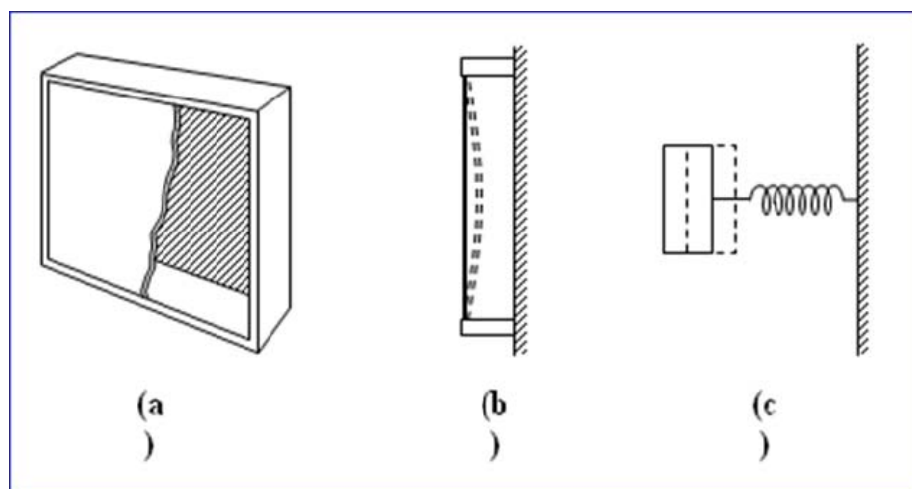


Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica



- d) **Resonadores de membrana.** Lámina o placa delgada de madera o metal ubicada sobre un marco o bastidor, encerrando cierto volumen de aire. El coeficiente de absorción máximo que puede lograrse en general es del orden de **0,5**.



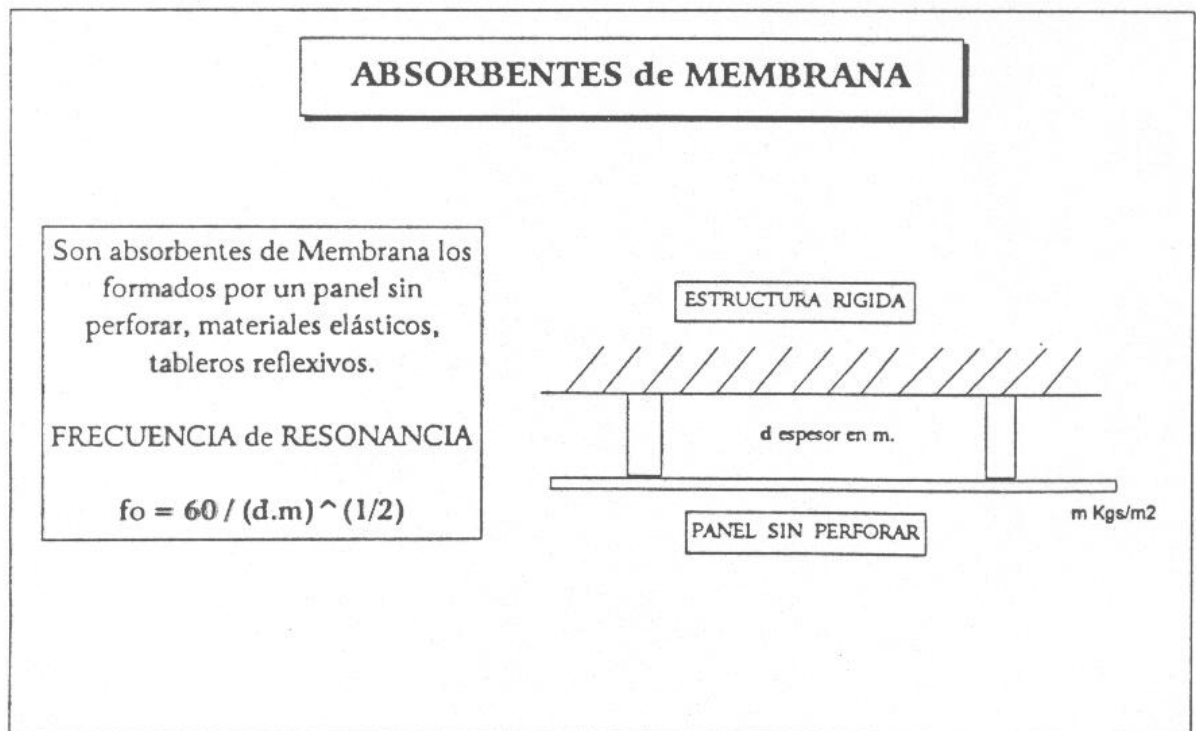
En este caso su frecuencia de resonancia se puede obtener con la siguiente ecuación,

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{d \cdot \rho_{\text{sup}}}} = \frac{60}{\sqrt{d \cdot \rho_{\text{sup}}}}$$

donde **c** es la velocidad del sonido, **d** la distancia entre la lámina y el fondo, **p** la densidad del aire, y **p_{sup}** la densidad superficial de la lámina (masa por unidad de superficie).



Un ejemplo práctico de estos resonadores son los **sistemas de paneles rígidos**, tienen ventajas artísticas y de construcción frente a los materiales porosos, como son resistentes a los golpes, duración, posibilidad de pintado, barnizado, etc. La absorción de cada elemento del sistema, se determina mediante los datos de construcción, tales como tipo de material, dimensiones del sistema, distancia a la que está colocada de la pared, forma de ensamblaje, debiendo prestar gran atención, ya que todo ello repercute en los parámetros acústicos del sistema. Los sistemas de paneles rígidos se suelen emplear para corregir la absorción a bajas frecuencias, creando un campo sonoro más difuso.



- e) **Absorbentes suspendidos (baffles absorbentes)**, se utilizan en algunos recintos, en los que existen pocas superficies susceptibles de colocar materiales absorbentes. En este caso, se suelen emplear unidades de materiales suspendidos libremente en el recinto a cierta distancia de sus superficies límites. Normalmente toman la forma de láminas planas o pantallas de material absorbente colgadas verticalmente en hileras continuas. La absorción de estos sistemas se calcula normalmente en función de la absorción de cada uno, por el número de unidades. Este valor aumenta con la separación entre los absorbentes y se aproxima a un valor constante con grandes separaciones. Los elementos suspendidos en hileras continuas de hilos de acero o cables tendidos entre paredes o vigas del techo, la separación puede variar desde 0,6 a 1,8 m y las hileras pueden correr en una o dos direcciones.

En la documentación adicional de este tema se pueden encontrar catálogos de materiales absorbentes ejemplo, además en la presentación de diapositivas hay unas tablas con el coeficiente de absorción por bandas de frecuencia de materiales habituales en la construcción así como fotografías y recomendaciones de montaje.



5. TÉCNICAS APLICADAS PARA EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

5.1 Teorías del acondicionamiento acústico

Como se ha podido comprobar por lo expuesto anteriormente, un recinto es un elemento que juega un papel importante en el campo sonoro que una fuente crea en su interior, influyendo sobre la señal que se propaga a través de él:

1. **Acompañando a la señal básica**, con unas reflexiones que pueden tomar la forma de eco, alterando su estructura en el tiempo.
2. **Alterando su color de tono**, al introducir cambios en su espectro de frecuencia.
3. **Incrementando su nivel de presión sonora**, mediante la energía de las reflexiones.
4. **Creando diferentes condiciones de recepción** en los diferentes puntos del recinto.

Los cambios que un campo sonoro experimenta, si la fuente sonora está situada en un espacio abierto o si se encuentra en el interior de un recinto, pueden ser tanto útiles como perjudiciales, desde el punto de vista de percepción auditiva. La prolongación que acompaña a cada impulso de una señal sonora irregular (palabra, música, etc), puede ser útil siempre que su duración sea la correcta, escuchándose la palabra con más claridad y la música con más animación. Si la prolongación es grande, la palabra es ininteligible y la música pierde musicalidad, por lo que la audición se empeora, al tener una calidad inferior. El énfasis de unas frecuencias frente a otras, produce un cambio en el timbre de la señal originada por la fuente. Por todo lo expuesto anteriormente, se deduce que es necesario un cuidadoso estudio del campo sonoro creado en un recinto por fuentes, con el fin de determinar bajo qué condiciones, ciertos cambios producidos por un recinto en la señal básica, son útiles o perjudiciales, así como determinar qué factores tienen influencia sobre la calidad de la palabra y de la música. Cuando se conecta una fuente sonora en un recinto, como consecuencia de las reflexiones, existe un crecimiento gradual de la energía, cesando posteriormente el aumento después de cierto tiempo, alcanzando la energía en el recinto un valor constante.

Si una vez alcanzado este valor, la fuente deja de emitir, el sonido que recibe el observador no desaparece inmediatamente. Un corto tiempo después de que la fuente ha dejado de emitir, desaparece la onda directa y el observador recibe la energía de la primera onda reflejada, después la segunda, tercera, etc, ondas reflejadas y así sucesivamente, siendo la energía de estas ondas cada vez más pequeña. Después de un cierto intervalo de tiempo, la energía de las ondas que llegan al observador, ha disminuido tanto, que el oído no puede percibir las y el sonido desaparece.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

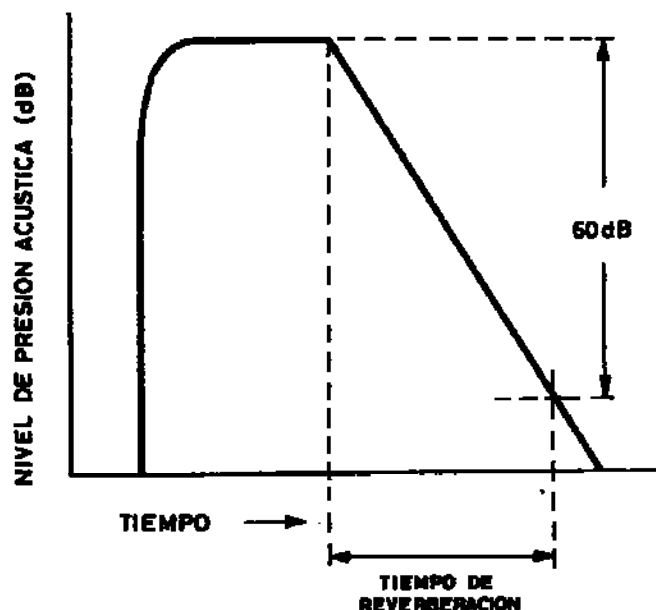


Figura 3.8. Proceso de crecimiento y disminución de la energía sonora en un recinto.

Si se elige para representar gráficamente esta variación una escala logarítmica, se observa que el proceso de crecimiento es relativamente rápido, mientras que el de descenso es más lento, representando además este gráfico la forma real de escucha del sonido, puesto que el oído no reacciona a la intensidad de la perturbación, sino a un valor próximo al logaritmo de esta intensidad (figura 8).

*El proceso de persistencia y disminución de la energía en un recinto, una vez desconectada la fuente sonora, recibe el nombre de **reverberación**, y el tiempo que la señal sonora necesita para reducirse hasta la millonésima parte (-60 dB) del nivel en el estado estacionario, se conoce como **tiempo de reverberación**.*

El recinto es un elemento que juega un papel importante en el proceso de radiación y recepción del sonido, teniendo además una influencia significativa sobre la calidad del mismo. Los cambios que un campo sonoro experimenta, si la fuente está situada en un espacio ilimitado o si se encuentra en el interior de un recinto, pueden ser útiles y perjudiciales a la vez, desde el punto de vista de percepción auditiva. La reverberación que acompaña a cada impulso de una señal irregular (palabra o música), puede ser útil siempre que la duración sea la debida, escuchándose la palabra más clara y la música más animada, debido al encadenamiento entre los sucesivos tonos musicales. Si la reverberación es muy grande, la palabra es menos inteligible, y en la música se produce un solapamiento entre las notas musicales, por lo que la audición se empeora, al tener menos calidad. El énfasis de algunos modos propios frente a otros del recinto, produce un cambio en el timbre de la señal básica de la fuente, originando un efecto adverso sobre la recepción de la palabra y la música.

En ciertas condiciones, el nivel de presión sonora de la señal básica, se incrementa, como consecuencia de la excitación de los modos propios de vibración del recinto, lo que es útil ya que este incremento en el nivel de presión sonora, es sensible especialmente para los oyentes que se



encuentran más alejados de la fuente; pero es indeseable la posible desigualdad en el incremento del nivel de presión sonora en los diferentes puntos del recinto, debido a las variaciones en la absorción de energía en los límites del mismo, puesto que perturba la uniformidad en las condiciones de audición de los oyentes situados en las distintas posiciones del recinto. Por todo lo expuesto anteriormente, se observa que es necesario un cuidadoso estudio del campo sonoro creado en un recinto por las fuentes, con el fin de determinar en qué condiciones ciertos cambios producidos por un recinto en la señal básica, son útiles o perjudiciales, así como determinar qué factores tienen influencia sobre la calidad de la palabra y de la música. Este análisis puede realizarse a partir de las teorías que permiten estudiar la acústica de un recinto, y que son:

- Teoría estadística,
- Teoría geométrica,
- Teoría ondulatoria,

Veamos seguidamente unas ideas generales sobre cada una de estas teorías:

5.1.1 Teoría estadística.

De la misma forma que la energía de una fuente sonora se radia en todas las direcciones, las ondas reflejadas en cualquier punto dentro de un recinto, también viajan en todas las posibles direcciones. Las fases de las ondas que llegan a cada uno de estos puntos, puede considerarse que están distribuidas de una forma **aleatoria**, debiendo recordar que los sonidos naturales (palabra y música) producidos en el interior de un recinto son señales aleatorias e irregulares. Esto permite determinar la **energía en cualquier punto de un recinto**, sin tener en cuenta los retardos de fase entre las ondas, así como la suma de los valores medios de la energía de las reflexiones que alcanzan el punto del recinto sometido a estudio. Las combinaciones de fenómenos aleatorios que tienen propiedades comunes, tales como son las combinaciones de las reflexiones que alcanzan cada punto del recinto se estudian mediante la matemática estadística, basada en la teoría de la probabilidad. El método estadístico no descubre los detalles intrínsecos del fenómeno, sin embargo su ventaja consiste en que mediante unas matemáticas sencillas, basadas en datos de los resultados del proceso, permite obtener unas conclusiones objetivas de los aspectos cuantitativos del proceso, así como de sus posibles defectos. Al aplicar matemáticas estadísticas a sucesos aleatorios, si por cualquier causa, el fenómeno deja de ser aleatorio, existe una pobre descripción del proceso, por ejemplo si algunas de las superficies interiores del recinto tienen propiedades de enfoque, la naturaleza aleatoria de la dirección de llegada de las ondas reflejadas, es menor, por lo que en este caso el análisis estadístico no se puede aplicar.

5.1.2 Teoría geométrica.

Cuando no se puede aplicar la teoría estadística, debe emplearse otra en la que el campo sonoro se considera como una **combinación de rayos**, contruidos a partir de las leyes de la acústica geométrica. De esta forma, la onda se ha sustituido por un rayo, a lo largo del cual se propaga la energía sonora. Mediante esta teoría se pueden determinar los **puntos de incidencia** de los rayos sobre las superficies límites del recinto, así como las **pérdidas de energía** debida a la absorción de los materiales que recubren las mencionadas superficies. Esto tiene una gran importancia cuando las superficies interiores están cubiertas con materiales de diferentes propiedades absorbentes. En este



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

caso, el campo sonoro en un recinto se estudia mediante la energía, determinada en cualquier punto, **calculando las pérdidas de todos los rayos** que después de reflejarse pasan por ese punto.

5.1.3 Teoría ondulatoria.

Esta teoría se basa en que el espacio de un recinto, se comporta como un **sistema vibratorio**, que se excita mediante la señal de la fuente sonora. De forma análoga a los modos normales de vibración de una cuerda (unidimensional), una membrana (bidimensional), en un recinto es tridimensional, por lo que el espectro de frecuencias es más complejo. Un detenido estudio del proceso ondulatorio, permite conocer la naturaleza del mismo, y comprender la forma en la que estas ondas influyen en las propiedades del recinto. Esta teoría se desarrolló a partir de unos experimentos unidimensionales, pudiendo verificarse mediante una matemática compleja.

En la actualidad, con el gran desarrollo de la informática y de los computadores, el estudio de la acústica de recintos ha experimentado un extraordinario avance, dando un gran paso adelante. El uso de las técnicas de trazado de los rayos sonoros en forma tridimensional en el proyecto de nuevos locales, ha dado paso a nuevas posibilidades en la predicción de sus propiedades (ver demo de software en *Documentos Adicionales*). Esta técnica mediante ordenadores permite estudiar simultáneamente la dirección y distribución en el tiempo y en el espacio de las reflexiones que inciden sobre un auditorio. Para obtener un grado razonable de precisión con estas técnicas, debe existir una cierta relación entre la densidad de los rayos y las dimensiones de la superficie a estudiar, por consiguiente se tienen que simplificar los planos de un local.

5.2 Conceptos y definiciones importantes.

Se define como **tiempo de reverberación** normalizado T_r en segundos, para una determinada frecuencia o banda de frecuencia al intervalo de tiempo empleado por la presión sonora en un recinto para que se origine una disminución de 60 dB en el nivel de presión una vez desconectada la fuente sonora.

Se define como **coeficiente difuso de absorción sonora** α , a la relación entre la energía sonora absorbida por una superficie uniforme, y la energía que incide uniformemente sobre dicha superficie.

Este coeficiente, definido teniendo en cuenta la gran variedad de ángulos de incidencia de las ondas distribuidas en el recinto, puede caracterizar al mismo, solo si las superficies que lo forman son suficientemente uniformes en sus propiedades físicas, si no es así, pero ocupan áreas iguales, el coeficiente medio viene expresado por:

$$\alpha_m = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i$$

siendo $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ los coeficientes difusos de absorción sonora de cada material.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Si las unidades de diferentes propiedades físicas ocupan áreas distintas, tendremos:

$$\alpha_n = \alpha_1 \frac{S_1}{S} + \alpha_2 \frac{S_2}{S} + \dots + \alpha_n \frac{S_n}{S} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot S_i)$$

donde $S_1, S_2, \dots$ son las áreas de las distintas unidades no uniformes; $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ son los coeficientes difusos de absorción de cada material y S el área total de todas las superficies internas del recinto.

La **absorción A** es la magnitud que cuantifica la energía extraída del campo sonoro, cuando la onda atraviesa un medio determinado, o el choque de la misma con las superficies límites del recinto. Está dada para la absorción a la frecuencia f por:

$$A_f = \alpha_f S$$

donde S es el área total de las superficies en m^2 , y α_f es el coeficiente de absorción sonora del material a la frecuencia f .

La **absorción sonora debida a las superficies límites del local** será:

$$A_1 = \alpha_n \cdot S = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot S_i) \quad (m^2)$$

Si en el interior del recinto existen *diferentes objetos y personas*, para encontrar la *absorción debida* a los mismos, multiplicamos la absorción equivalente de un objeto por el número total de objetos que hay en el recinto, es decir:

$$A_2 = \alpha_1 \cdot n_1 + \alpha_2 \cdot n_2 + \dots = \sum_{j=1}^n (\alpha_j \cdot n_j) \quad (m^2)$$

donde α_j es la absorción equivalente de cada elemento y n_j el número de elementos.

Por consiguiente la absorción total será:

$$A = A_1 + A_2 = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot S_i) + \sum_{j=1}^n (\alpha_j \cdot n_j) \quad (m^2)$$

siendo el coeficiente medio de absorción sonora:

$$\alpha_n = \frac{A_1 + A_2}{S} = \frac{1}{S} \left[\sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot S_i) + \sum_{j=1}^n (\alpha_j \cdot n_j) \right]$$

La **absorción del aire** está dada por la expresión:

$$A_{\text{aire}} = 4 m V \quad (m^2)$$

donde m es el coeficiente de atenuación del aire por metro y V es el volumen del recinto en m^3 . Se conocen los valores de m en función de la humedad relativa para distintas frecuencias a una temperatura de 20°C. La dispersión geométrica, supone que la potencia total permanece constante al



alejarse de la fuente. Esto no es del todo cierto, de hecho, una parte de la energía se convierte en calor cuando viaja a través del aire; aunque esta conversión normalmente solo es importante para las frecuencias altas y cuando se consideran grandes distancias. La absorción "clásica" es debida a la viscosidad y a la conductividad térmica del aire, pero ambas son despreciables cuando se las compara con la absorción "molecular". La presencia de vapor de agua en el aire facilita la excitación por la onda sonora de las vibraciones resonantes de las moléculas del oxígeno y del nitrógeno. La cantidad de energía transferida por este mecanismo depende fundamentalmente de la frecuencia, de la humedad relativa y, en menor grado, de la temperatura.

El coeficiente de atenuación m de la energía sonora en el aire, se encuentra a partir de los valores de esta tabla para una temperatura de 20°C:

Relative humidity (%)	0.5 kHz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	Air absorption
40	0.4	1.1	2.6	7.2	23.7	10^{-3} m^{-1}
50	0.4	1.0	2.4	6.1	19.2	10^{-3} m^{-1}
60	0.4	0.9	2.3	5.6	16.2	10^{-3} m^{-1}
70	0.4	0.9	2.1	5.3	14.3	10^{-3} m^{-1}
80	0.3	0.8	2.0	5.1	13.3	10^{-3} m^{-1}

La absorción sonora total en un recinto es igual a la suma de la absorción debida a las diferentes superficies límites del recinto $A_{\text{superficies}}$, más la absorción debida a los objetos, mobiliario, personas, etc. A_{objetos} y por último la absorción debida al aire A_{aire} . Por consiguiente la absorción total estará dada por:

$$A = A_{\text{superficies}} + A_{\text{objetos}} + A_{\text{aire}} \quad (\text{m}^2)$$

la unidad de absorción es el equivalente a 1 m^2 de superficie absorbente perfecta.

La fórmula del tiempo de reverberación de **Sabine** de un recinto, se puede dar a partir de la expresión:

$$T = 0,161 \left(\frac{V}{A} \right) \quad (\text{s})$$

siendo 0,161 el valor de una constante para una temperatura de 20°C, donde V es el volumen en m^3 y A es la absorción total en m^2 , obtenida a partir de $A = \alpha S$, donde S es el área total de sus superficies interiores y α es el coeficiente de absorción sonora, que debe ser $\bar{\alpha} < 0,2$. La fórmula de Sabine es la recomendada en el DB-HR.

La fórmula de **Eyring** para el tiempo de reverberación (para salas más absorbentes, $\bar{\alpha} > 0,2$), solo es aplicable cuando los coeficientes de absorción sonora son de valores numéricos parecidos para todas las superficies límites (distribución homogénea), siendo:

$$T = 0,161 \left(\frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \right) \quad (\text{s})$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

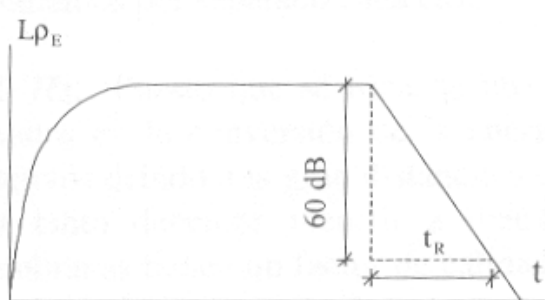
Acústica Arquitectónica

Las pérdidas de energía sonora en un recinto, debidas al aire, sólo tienen influencia a **altas frecuencias** (2.000-4.000 Hz), y en recintos de **gran volumen** (superior a 5.000 m³). Luego para recintos pequeños y frecuencias inferiores a 2.000 Hz, se puede despreciar el término 4mV.

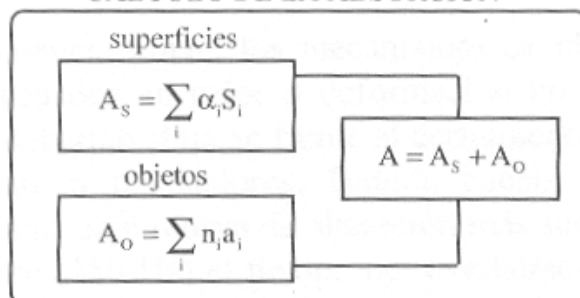
Cuando la variedad de materiales en el recinto es grande, y la diferencia entre los valores de los coeficientes de absorción también, la mayor aproximación al tiempo de reverberación se obtiene empleando la fórmula de Millington-Sette:

$$T = 0,161 \left(\frac{V}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \alpha_i} \right) \quad (2)$$

donde S_i es el área del material i ésimo y α_i el coeficiente de absorción de dicho material.



CÁLCULO DE LA ABSORCIÓN



CÁLCULO DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN

CÁLCULO DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN			Efecto del aire
$\bar{\alpha} = \frac{A}{\sum_i S_i}$	$\bar{\alpha} \leq 0,2$	Sabine	$t_R = \frac{0,162 \cdot V}{A}$
	$\bar{\alpha} > 0,2$	Eyring	$t_R = \frac{0,162 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV}$

El tiempo de reverberación depende además de la forma del recinto, de las posiciones de la fuente sonora y de los materiales absorbentes, no siendo constante para todas las frecuencias, ya que la absorción tanto en el aire como en las superficies interiores, depende de la frecuencia. Generalmente, con fines prácticos, *los cálculos del tiempo de reverberación se hacen en octavas para frecuencias de 125, 250, 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz*, a las que los fabricantes facilitan los coeficientes de absorción de sus productos.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Varias investigaciones han revelado que existe una importante **correlación** entre el **tiempo de reverberación** y la **calidad acústica** de los recintos dedicados a aplicaciones específicas.

Un análisis estadístico de datos obtenidos en diversas salas del mundo consideradas de gran calidad acústica para cada finalidad demuestra que para cada aplicación existe un tiempo de reverberación óptimo que aumenta con el volumen del recinto.

Se define como **tiempo óptimo de reverberación** T_{op} al que proporciona la mejor calidad del sonido en un recinto, pudiéndose determinar solo por métodos experimentales, y dependiendo: del uso del recinto, de sus dimensiones, de la naturaleza de la fuente sonora, del tipo de obra musical y de las frecuencias sonoras.

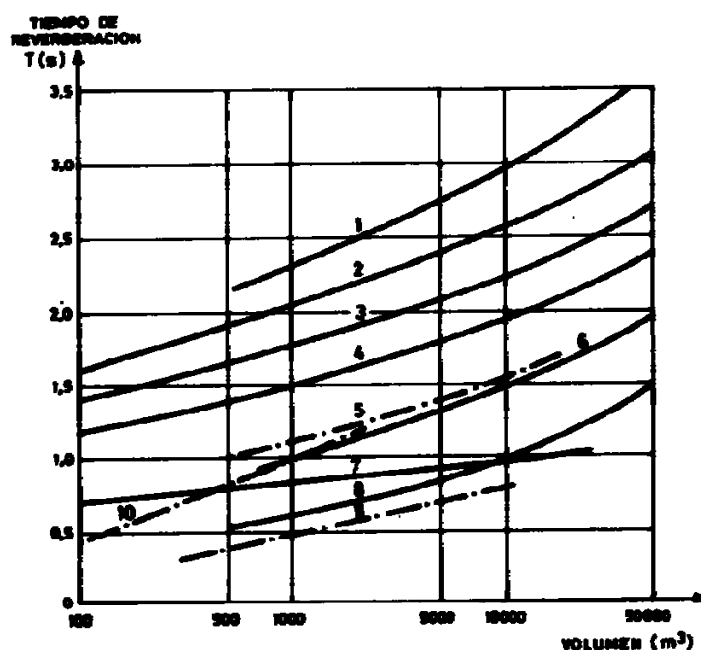


Figura 3.9. Variación del tiempo de reverberación con el volumen en recintos considerados con buena acústica, a frecuencias medias 500 Hz para: 1) música religiosa; 2) salas de concierto para música orquestal; 3) salas de concierto para música ligera; 4) estudios de concierto; 5) salas de baile; 6) teatros de ópera; 7) auditorios para la palabra; 8) cines y salas de conferencias; 9) estudios de televisión y 10) estudios de radio

El tiempo de reverberación es el principal criterio para evaluar el comportamiento acústico de un recinto, aunque no el único. En función del empleo que tenga un local, deberá ser el valor de su tiempo de reverberación, así como su variación en función de la frecuencia (figura 3.9).

Existen más estudios que dan lugar a otras gráficas o formulas de recomendación del T_r óptimo según el uso y volumen de la sala. Por ejemplo;

Fórmula de LIFSHITS, para locales grandes $T_{op}(s) = 0,41 \log V$

Fórmula de MAYER y THIELE, para locales pequeños $T_{op}(s) = 0,09 \cdot V^{(1/3)}$



La inteligibilidad de la palabra es la capacidad de comprensión de la palabra en un recinto determinado y depende de la distancia al orador, el nivel de voz del orador, el Tr de la sala, el ruido de fondo y el conocimiento del orador, entre otras.

Si el tiempo Tr es demasiado pequeño, la energía sonora se disipa rápidamente y por lo tanto no llega a acumularse en el recinto. En consecuencia, el nivel sonoro es demasiado bajo, y se dificulta la inteligibilidad del mensaje.

Si, por el contrario, Tr es demasiado alto, tiende a producirse una superposición de sonidos originalmente generados en sucesión, llegando a enmascarse algunos sonidos débiles por la reverberación de otros más fuertes emitidos previamente. Por ejemplo, algunas consonantes podrían quedar enmascaradas por las vocales anteriores.

El volumen de aire en un recinto es un sistema vibratorio complejo, cuyas constantes están distribuidas, con un gran número de frecuencias características. Los modos normales de vibración se representan como un modelo complejo de ondas estacionarias.

Si consideramos un recinto, en el que el campo sonoro no es uniforme, y la absorción de energía despreciable, al situar una fuente sonora radiando en una de las superficies laterales, la energía que proporciona, se puede suponer soportada por el campo de ondas estacionarias originadas en el recinto. Las ondas que se propagan según direcciones paralelas a los ejes X, Y, Z, debido a las reflexiones entre dos superficies paralelas, se llaman "axiales"; las que se distribuyen paralelamente a un par de superficies, debido a la reflexión entre cuatro superficies se llaman "tangenciales"; y las que se forman debido a la reflexión entre todas las superficies se denominan "oblicuas" (figura 3.10).

El valor de las frecuencias características de un local está dado por la expresión:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Hz})$$

donde c es el valor de la velocidad del sonido en el aire; l_x , l_y y l_z son las dimensiones del recinto de forma paralelepípeda rectangular; y n_x , n_y y n_z pueden tomar los valores 0, 1, 2, . .

A partir de esta ecuación, se pueden encontrar los valores de las frecuencias **axiales** según la dirección X, para $n_x = n_y = 0$ y para $n_z = 1, 2, 3, \dots$ de forma análoga para las ondas axiales según otras direcciones. Para las **ondas tangenciales** se hace de la forma, $n_z = 0$ y $n_x = 1, 2, \dots$, así como $n_y = 1, 2, \dots$, obteniendo los diferentes valores, mientras que para las **ondas oblicuas**, los valores que pueden tomar son $n_x, n_y, n_z = 1, 2, \dots$

Por todo lo expuesto anteriormente, *las frecuencias de los modos normales de vibración de un recinto, están agrupadas en un espectro más denso, o sea el campo sonoro en el recinto es más constante, si su longitud, anchura y altura no son iguales ni múltiplos unas de otras.*

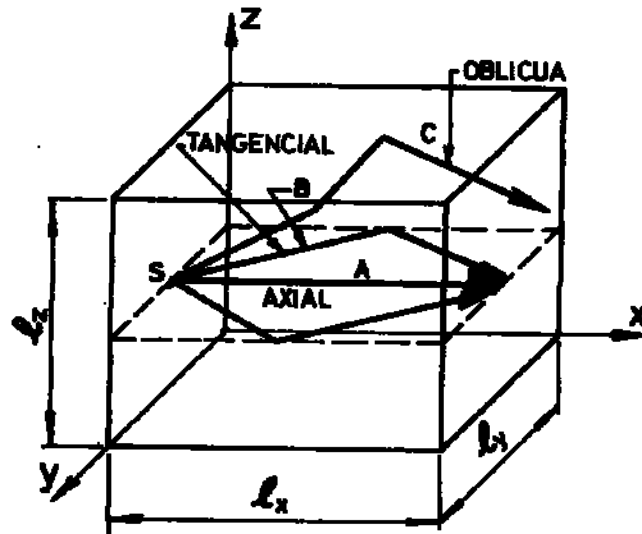


Figura 3.10. Ondas axiales, tangenciales y oblicuas

La respuesta de un local debe ser lo más neutra posible, y para esto es necesario que el número de frecuencias características sea **elevado** y su distribución lo **más regular posible**, ya que si esto no se cumple, para señales complejas (música, palabra), las frecuencias que se encuentren entre dos frecuencias características se verán anuladas por otras que, por coincidir con ellas, serán amplificadas por el fenómeno de la resonancia. En todo este proceso las más perjudicadas son las bajas frecuencias, sobre todo en locales pequeños, ya que la frecuencia de corte de un recinto, vendrá dada por : $f_c = c/2l_{max}$; siendo l_{max} la longitud mayor del recinto.

El **número total de frecuencias**, debido a las ondas axiales, tangenciales y oblicuas, y la **densidad del espectro de frecuencias**, están dadas por las ecuaciones:

$$N = \left[\frac{4\pi}{3c^3} V f_n^3 + \frac{\pi}{4c^2} S f_n^2 + \frac{1}{8c} L f_n \right]$$

$$\Delta N = \left[\frac{4\pi}{c^3} V f_n^2 + \frac{\pi}{2c^2} S f_n + \frac{1}{8c} L \right] \Delta f_n$$

donde

$$L = 4 (l_x + l_y + l_z) ; S = 2 (S_{xy} + S_{xz} + S_{yz}) ; V = l_x l_y l_z.$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se observa que solo para recintos muy pequeños, y a bajas frecuencias, la densidad del espectro de frecuencias características es pequeña, esto origina una desigualdad del campo sonoro en el recinto. Si el local es grande, existe una mayor densidad espectral, incluso a bajas frecuencias.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

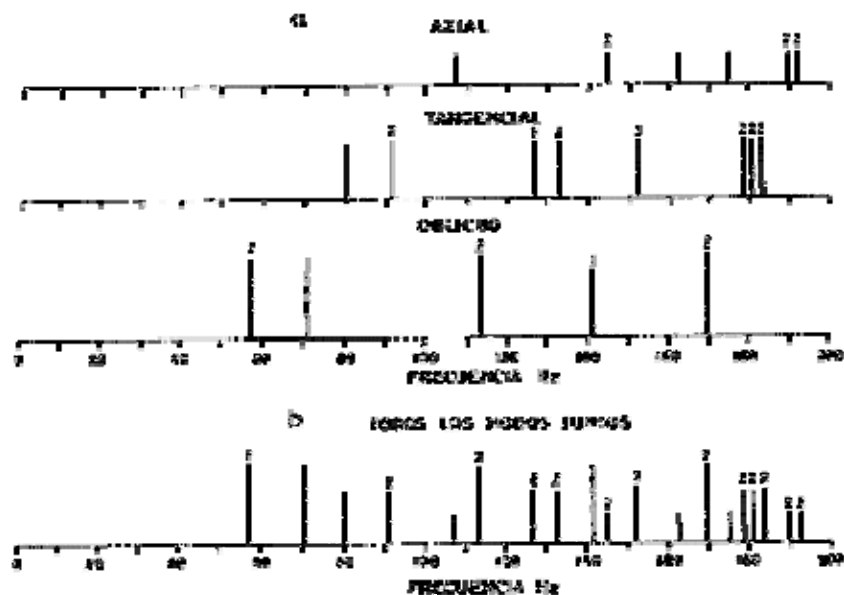


Figura 3.11. Espectro de frecuencias de un recinto

En la tabla siguiente se presenta un ejemplo de cálculo de las frecuencias características de un recinto.



Dimensiones recinto: 13,8 · 8,4 · 6 m Volumen: 695,52 m ³ Área total: 498,2 m ²							
Número de los modos propios			Frecuencia (Hz)				
n _x	n _y	n _z	Modos axiales	Modos tangenciales	Modos oblicuos	Modos totales	Diferencia entre modos
1	0	0	12,3	--	--	12,3	--
0	1	0	20,2	--	--	20,2	7,9
1	1	0	--	23,7	--	23,7	3,5
2	0	0	24,6	--	--	24,6	0,9
0	0	1	28,3	--	--	28,3	3,7
1	0	1	--	30,9	--	30,9	2,6
2	1	0	--	31,9	--	31,9	1,0
0	1	1	--	34,8	--	34,8	2,9
1	1	1	--	--	36,9	36,9	2,1
3	0	0	37,0	--	--	37,0	0,1
2	0	1	--	37,5	--	37,5	0,5
0	2	0	40,5	--	--	40,5	3,0
3	1	0	--	42,1	--	42,1	1,6
1	2	0	--	42,3	--	42,3	0,2
2	1	1	--	--	42,7	42,7	0,4
3	0	1	--	46,6	--	46,6	3,9
2	2	0	--	47,4	--	47,4	0,8
4	0	0	49,3	--	--	49,3	1,9
0	2	1	--	49,4	--	49,4	0,1
3	1	1	--	--	50,8	50,8	1,4
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
3	0	4	--	119,2	--	119,2	0,6
2	4	3	--	--	119,9	119,9	0,7
0	2	4	--	120,3	--	120,3	0,4
3	1	4	--	--	120,9	120,9	0,6
1	2	4	--	--	121,0	121,0	0,1
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
4	5	5	--	--	180,9	180,9	2,9
5	5	5	--	--	184,7	184,7	3,8



5.3 Absorbentes sonoros

Son todos aquellos materiales o sistemas que disponen de elevados coeficientes de absorción sonora en todo o en parte del espectro de frecuencias audibles.

Los más típicos, y desde luego los únicos, con características de verdadero material, son los materiales porosos; siendo, los demás, dispositivos o estructuras absorbentes.

Los **materiales porosos** están constituidos por un medio sólido (esqueleto), recorrido por cavidades más o menos tortuosas (poros) comunicadas con el exterior.

La degradación de la energía acústica se produce por fricción viscosa del fluido en el seno de las cavidades.

Desde el punto de vista del comportamiento acústico, conviene distinguir entre materiales de esqueleto **rígido y flexible**. En los primeros el coeficiente de absorción aumenta con la frecuencia, mientras que en los segundos se presentan resonancias (máximos) de absorción a frecuencias bajas y medias.

Los **resonadores**; como su propio nombre indica, producen la absorción de energía acústica mediante un proceso de resonancia. El movimiento resonante de una parte del sistema extrae energía del campo acústico, de manera selectiva y preferente, en una banda de frecuencias determinada.

Hay diversas fórmulas para el cálculo de la frecuencia central de resonancia, y así poder utilizar el más adecuado en cada caso.

Los absorbentes **anecoicos**, también llamados dispositivos de absorción con variación progresiva de las características físicas, hacen uso del hecho por el que la reflexión de una onda acústica se produce cuando encuentra una variación de las características físicas del medio en que se propaga. Con la variación gradual de éstas, se pretende reducir al mínimo el obstáculo que presenta el material.

Con estas absorbentes se logran coeficientes de absorción a incidencia normal superiores al 99%, a partir de una determinada frecuencia llamada de corte. Su utilización es específica en cámaras anecoicas.

En la práctica son tres los materiales o sistemas utilizados:

- Materiales porosos.
- Resonadores de placa.
- Resonadores de Helmholtz.



5.3.1 Materiales porosos

Los materiales porosos están constituidos por una estructura que configura una elevada cantidad de poros, comunicados entre sí. Los materiales de estructura fibrosa se ajustan exactamente a esta configuración.

Al incidir una onda acústica sobre la superficie del material, un importante porcentaje de la misma penetra por los huecos; haciendo entrar en vibración a las fibras, con lo que se produce una transformación en energía cinética de parte de la energía acústica.

Por otra parte, el aire que ocupa los poros entra en movimiento; produciéndose unas pérdidas de energía por el rozamiento de las partículas con el esqueleto, que se transforma en calor.

Como quiera que la sección de que dispone la onda acústica esté limitada por el esqueleto o elemento sólido; se comprende que el comportamiento del material dependerá de la porosidad del mismo.

Efectivamente, la elevada absorción acústica de los materiales constituidos por fibras de vidrio o roca es explicable a su elevada porosidad que puede rebasar el 99%.

No obstante, como quiera que los espesores de capa que normalmente se utilizan es muy limitada, por problemas de espacio y costo, la absorción acústica con materiales porosos es muy elevada a las altas frecuencias y limitada a las bajas. Efectivamente, para obtener un grado de absorción del 99%, es necesario un espesor para una determinada frecuencia; equivalente a $\lambda/4$ (λ longitud de onda).

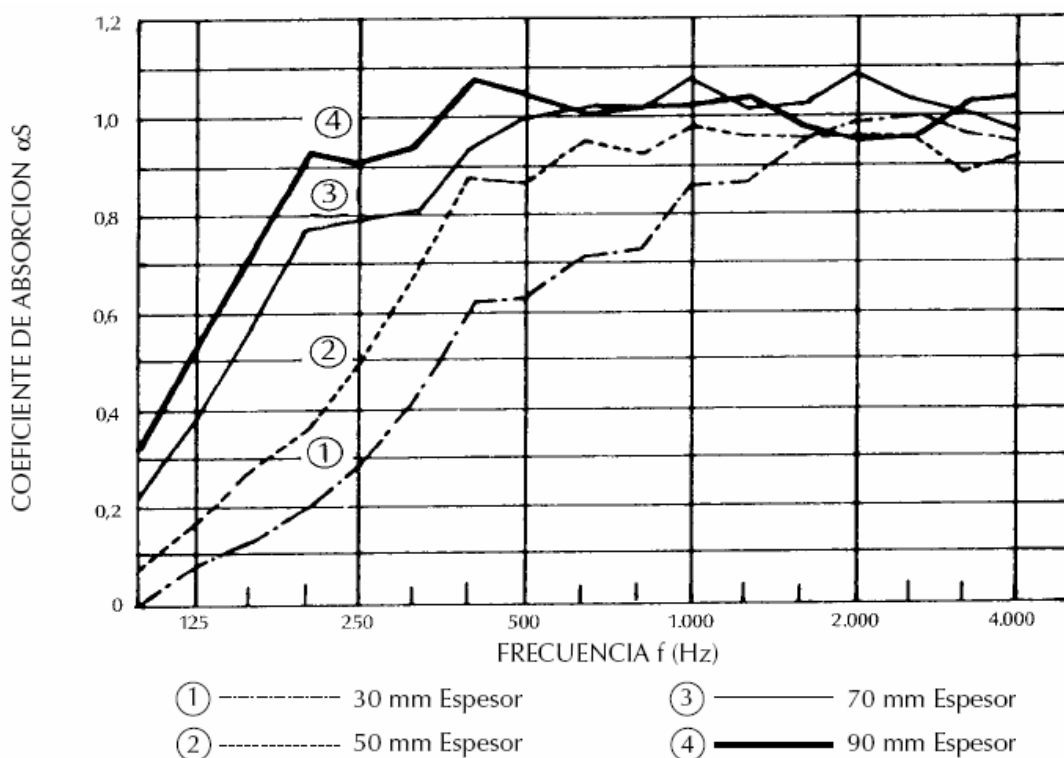


Figura 3.12. Absorción acústica de paneles de lana de roca «ROCLAINÉ» de densidad 70 kg/m^3 apoyados sobre una superficie rígida.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

En la Fig. 12 aparecen las curvas de absorción acústica de un panel de lana de roca con diferentes espesores. Observando las mismas, puede apreciarse lo anteriormente expuesto: la influencia del espesor sobre el coeficiente de absorción. Efectivamente, así como para las altas frecuencias el comportamiento está muy en línea para los cuatro espesores considerados, en las medias y especialmente en bajas frecuencias, se aprecia claramente la ganancia obtenida al aumentar el espesor.

Se observa que, según la figura 3.12 de la página anterior, la lana de roca tiene un $\alpha > 1$ en algunas frecuencias. Esto es físicamente imposible, y es debido a una mala ejecución del método de obtención del α en laboratorio en la cámara reverberante. Es un error de esta base de datos de materiales y no se deben usar estos datos, en todo caso aproximar el valor a 1.

Otros factores de influencia son los espacios vacíos entre el material absorbente y la pared rígida (cámara) y los revestimientos.

La cámara actúa como un implementador del espesor real del material, de modo que se consiguen absorciones más elevadas para un mismo producto según su disposición esté más alejado de la pared rígida.

Este hecho tiene especial relevancia en las bajas y medias frecuencias, pero no en las altas, ya que en éstas los coeficientes de absorción son de por sí muy elevados.

El otro aspecto importante es el revestimiento con el que se presentan habitualmente estos productos para su comercialización.

Los **revestimientos** pueden ser de dos clases: porosos e impermeables.

Si el revestimiento es **poroso**, no presenta una impedancia importante al paso del aire, por lo que los valores de absorción del material base no resultan modificados prácticamente. Es el caso de los revestimientos de tejidos de fibra de vidrio u otros materiales y las aplicaciones de pinturas con pistola.

Los revestimientos **impermeables** (láminas plásticas o metálicas) modifican sustancialmente el espectro absorbente acústico del material de base, sobre todo a partir de las frecuencias en que la resistencia de masa de la lámina supera la impedancia del aire.

Se incorpora una tabla extraída del libro «Acústica en los edificios», de M. Meisser donde están agrupados tipológicamente diversos materiales, indicando también su comportamiento a distintas gamas de frecuencias, donde:

G = gama de sonidos graves.

M = gama de sonidos medios.

A = gama de sonidos agudos.



NATURALEZA	ASPECTO	FORMA DE COLOCACION	PROCESO DE ABSORCION	VALOR ACUSTICO RELATIVO	OBSERVACIONES
Placas de fibras minerales comprimidas. • Lana de roca. • Lana de vidrio.	Placas rígidas con superficie uniforme o fisurada o ranurada.	Encoladas.	La absorción es debida a la porosidad de las placas.		Estos materiales son imputrescibles y no combustibles. Pueden encolarse sobre paramentos verticales. No es conveniente pintar estas placas, salvo, eventualmente, con pintura al agua que no tape los poros.
			Al efecto de porosidad se añade un efecto de diafragma que aumenta la absorción de los graves.		
Placas de fibras minerales poco comprimidas con una lámina plástica. • Lana de vidrio.	Placas semirrígidas autoportantes.	Suspendidas.	La absorción es debida a la porosidad y al efecto diafragma de la placa suspendida. La película plástica modera la absorción de los agudos en favor de los medios.		Estos materiales son interesantes por su poder absorbente casi uniforme. Imputrescible y no combustible.
Placas de fibras vegetales comprimidas. • Fibra de madera. • Fibra de caña de azúcar. • Paja, caña.	Superficie uniforme fisurada, estriada, ranurada o perforada.	Encoladas.	La absorción es debida a la porosidad.		Es un material combustible. Es conveniente no pintarlo. Pueden encolarse sobre paramentos verticales.
			La absorción es debida a la porosidad y al efecto de diafragma.		
Placas de fibras de madera	Fibras de madera aglomeradas con cemento. El aspecto es poco decorativo si queda a cara vista.	Encoladas o clavadas.	La absorción es debida a los grandes poros del material.		El poder absorbente aumenta con el espesor. Sólo pueden aplicarse sobre paramentos planos. Es un material combustible.
			La absorción aumenta por el efecto de diafragma.		
Enrejados o tejidos.		Suspendidos o fijados sobre armadura.	Se obtiene el resultado que corresponde al material que recubren. Una placa de lana de vidrio colocada sobre un tejido de gran malla da el resultado de la lana de vidrio.		Pueden ser colocados en revestimientos de muros con materiales combustibles, pero pueden ignitugarse.
Poliestireno expandido.	Placas blancas.	Encoladas.	Las células están cerradas y la porosidad tiene poco efecto.		Solo el poliestireno cortado mecánicamente tiene una ligera eficacia. Es un material combustible.
			Efecto de membrana ligera.		
Proyecciones de fibras minerales.	Superficie rugosa irregular		Absorción por porosidad.		El revestimiento es bastante frágil, se debe proyectar sobre superficies accesibles para poder efectuar reparaciones.
Enlucidos porosos con base de yeso, vermiculita.	Pueden teñirse en la masa.		Eficaz solamente en frecuencias agudas.		
Pinturas absorbentes	Colorido variado.		Eficacia débil y sobre todo en los graves y medios.		



5.3.2 Resonadores de placa

Si de acuerdo con el espectro del ruido producido, debe realizarse el tratamiento especialmente en bajas frecuencias y si no se dispone del espacio suficiente la solución más idónea es la aplicación de resonadores de placa.

Estos consisten en una placa u hoja que vibra sobre un colchón de aire. Si la placa es suficientemente grande y no demasiado rígida, la fuerza de retroceso vendrá definida por la rigidez de la capa de aire.

El grado de absorción de estos resonadores depende de las pérdidas internas del material de placa u hoja y de las pérdidas por frotamiento en puntos de sujeción.

Dicho grado de absorción más bien limitado puede aumentarse rellenando el espacio de aire con un material absorbente de lana mineral (ver Fig. 13).

El material absorbente introducido en la cámara, amortigua las vibraciones reflejadas en la pared rígida, detrás de la placa y que no permiten la vibración completa de ésta, dando lugar en su ausencia a una reducción de la energía absorbida y, por tanto, del valor del coeficiente de absorción.

Lo que sí es importante es cuadrricular el espacio de aire para evitar la propagación tangencial de sonido.

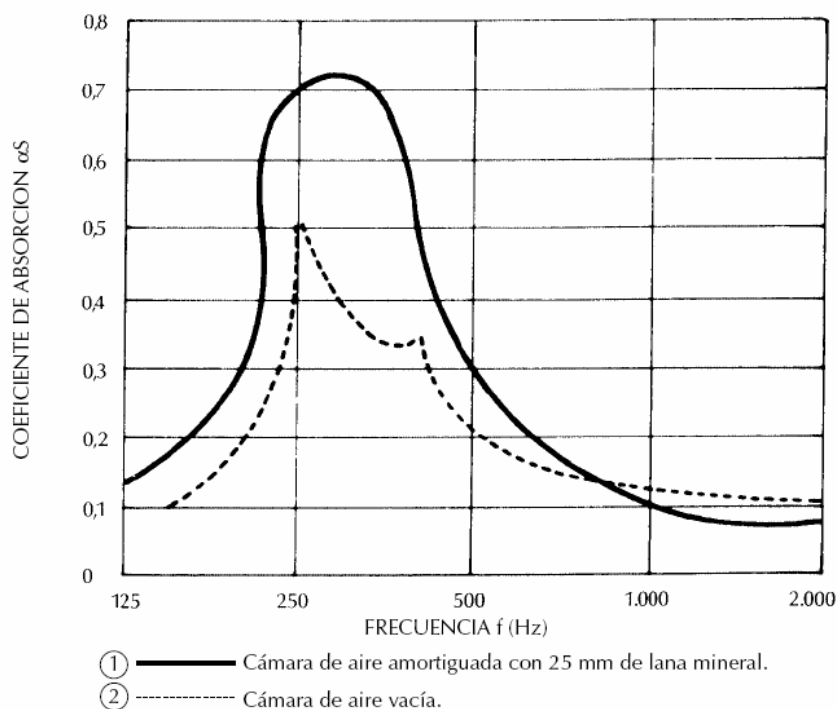


Figura 3.13. Coeficientes de absorción acústica de un panel contrachapado de 1,5 mm. con cámara de aire de 60 mm.



5.3.3 Resonadores de agujero o de Helmholtz

La constitución de los resonadores de agujero es en esencia la misma que los resonadores de placa, con la diferencia de que la placa u hoja va provista de perforaciones. Al igual que en los resonadores de placa, debe cuadrícularse el espacio de aire, a fin de evitar la propagación de sonido paralela a la placa.

El tamaño de las cuadrículas debe ser pequeño en comparación con la longitud de onda del sonido a amortiguar.

Con este tipo de resonadores se consigue, para un espesor limitado, un elevado grado de absorción para la gama de frecuencias medias. La amortiguación en este caso está determinada por el rozamiento del aire con las paredes de las perforaciones, acompañado de un desprendimiento de calor. Como en caso de los resonadores de placa, el relleno del espacio de aire con un material poroso a base de lana mineral aumenta el grado de absorción.

En la Fig. 14 se representa la curva de absorción de un resonador de agujero, compuesto por una placa rígida de 9,5 mm de espesor y un 8,3% de superficie perforada, con un espacio de aire de 50 mm relleno con lana de roca.

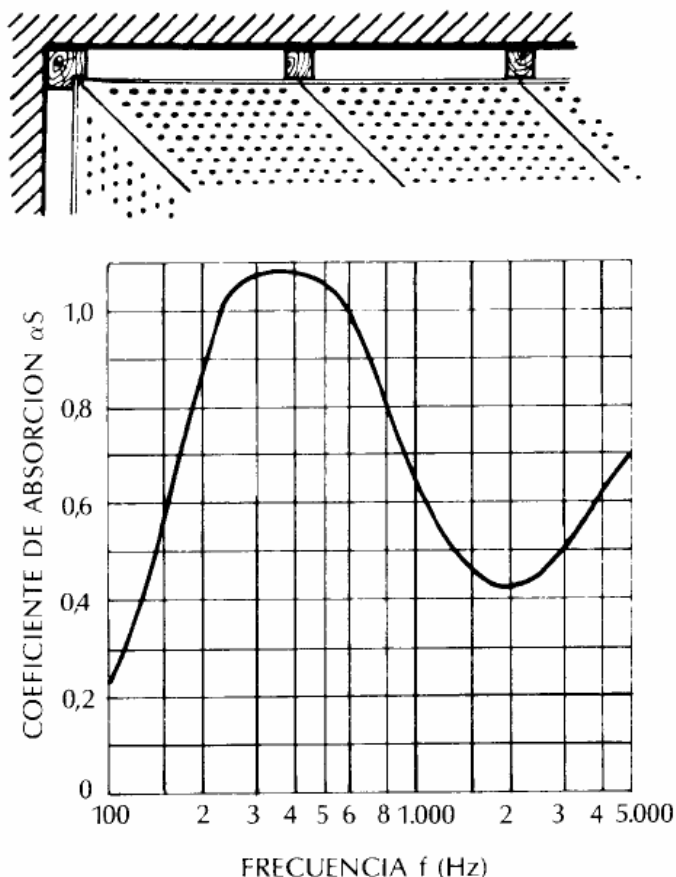


Figura 3.14. La curva corresponde a una placa rígida de 9,5 mm con agujeros de 15 mm de diámetro, distanciados a 46 mm (superficie agujeros 8,3%), separada de la pared a 50 mm y rellena de la cámara con lana de roca.



En el apartado 3 de la presentación de diapositivas incluida en la zona materiales se presentan fotografías y gráficas de soluciones constructivas y puesta en obra de sistemas de acondicionamiento cuya lectura es recomendada.

5.4 Recomendaciones generales

En este apartado se tratan resumidamente las medidas encaminadas a mejorar la calidad de escucha de una sala.

Para salas **pequeñas**, esta mejora supone solamente el conseguir un tiempo de reverberación entre ciertos límites dados, que se conoce como **«tiempo de reverberación óptimo»**. Para salas **grandes**, también influye **la forma de las mismas, la distribución de materiales absorbentes, así como el uso que se vaya a hacer de ella**.

De una manera general, las cualidades acústicas que debe tener un local destinado a auditorio son las siguientes:

- a) La intensidad acústica de los sonidos útiles (palabra, canto, música, etc.) debe superar netamente a la de los ruidos de fondo. Ello supone que:
 - La sala no sea desproporcionadamente grande en relación con la potencia de las fuentes sonoras. En efecto, la sonoridad depende a la vez de la intensidad del sonido directo y de la intensidad del sonido reflejado. Por un lado, la intensidad del sonido directo es menor cuanto mayor sea la distancia fuente-receptor; por ejemplo, tomemos el caso de un buen orador que emite con un nivel de 80 dBA, a 30 m, el nivel del sonido directo no es más que 40 dBA aproximadamente. Por otro lado, la intensidad del sonido reflejado es menor cuanto mayor sea el poder absorbente del local, y este poder crece en las grandes salas con la superficie ocupada por el público.
 - La forma de la sala sea tal que el sonido directo que llega de la fuente a los oyentes esté libre de obstáculos y, en particular, que no pase muy cerca del público, pues se producirá una absorción no deseable que se uniría a la atenuación producida por la distancia. Lo más indicado es que el lugar para el auditorio se distribuya en gradas; esta condición, además, es favorable para una buena visión de la escena.
 - El poder de absorción de la sala se ajusta de manera que la reverberación refuerce el sonido directo, sin hacerle perder su claridad por una prolongación excesiva de cada emisión sonora.
 - Los ruidos de fondo sean de un nivel muy bajo, cuando la intensidad de los sonidos útiles sea débil. Para ello, el local debe estar bien protegido de los ruidos exteriores, y además los equipos del local (asientos, ventiladores, etc.) deben ser lo más silenciosos posible.



b) La calidad del sonido percibido debe ser buena, en particular mediante:

- Ausencia de accidentes acústicos con ecos.
- Claridad apropiada a la naturaleza de la escucha. Por ejemplo, para la palabra, la claridad debe ser bastante superior a la del caso de la música.
- Reverberación apropiada a cada tipo de música.

Todas estas características están ligadas a la forma del local, así como a su poder absorbente (o tiempo de reverberación).

6. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO EN EL DB-HR

6.1 Exigencias de absorción acústica y Tr

Los objetivos de aplicación de las exigencias marcadas para el acondicionamiento acústico en la edificación son:

- Mejorar las condiciones acústicas en aulas y salas de conferencias de volumen inferior a 350 m³.
- Disminuir el ruido interior en restaurantes, comedores y zonas comunes.

Con respecto a la **absorción acústica** los valores límite establecidos son:

- **Zonas comunes**

- Zona interior que da servicio a varias unidades de uso:
 - Un pasillo da servicio a aulas
 - El pasillo que da servicio a varios despachos y
 - Un rellano en un edificio de viviendas

Valor límite: $A \geq 0,2 \text{ m}^2/\text{m}^3$

- Se recomienda una distribución de la absorción acústica uniforme

El **Procedimiento de verificación** consiste en

1. Determinar la **absorción acústica total exigida** en función del volumen del recinto
2. **Cálculo de la absorción acústica**
 - a. Definición de los elementos constructivos de los paramentos de la zona común
3. **Justificación** mediante ficha justificativa
 - a. Anejo del DB-HR

El **método de cálculo** consiste en el uso de la formula siguiente:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^N A_{O,m,j} + 4 \cdot m_m \cdot V$$



- $\alpha_{m,i}$, coeficiente de absorción acústica medio de cada paramento para 500, 1000 y 2000 Hz
- S_i , área del paramento
- $A_{o,m,j}$, área de absorción acústica equivalente media de cada objeto diferente para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz
- $m = 0,0006m^{-1}$. Coeficiente de absorción acústica medio en el aire, para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz. Usar para volúmenes grandes. Si $V < 250 m^3$, $m \approx 0$
- V , volumen del recinto

Para ello necesitaremos unos datos previos del coeficiente de absorción que podemos obtener de:

- **Materiales más usuales en la edificación.**
 - Catalogo de elementos constructivos
- **Materiales absorbentes específicos: mantas, fibras, espumas, paneles, ...**
 - Datos del fabricante

Con respecto al **tiempo de reverberación** los valores límite exigidos se clasifican en el siguiente ámbito de aplicación:

- Aulas hasta $350 m^3$
- Salas de conferencias hasta $350 m^3$
 - Mejorar la inteligibilidad de la palabra
 - Aulas y salas de conferencias de mayor tamaño requieren de un **estudio específico** (mediante 3 teorías: geométrica, ondulatoria, estadística, esto queda fuera de DB-HR)
- Comedores y restaurantes
 - Disminuir el ruido de fondo

Dando lugar a las siguientes exigencias según el tipo de recinto:

- Aulas y salas de conferencias vacías, sólo tratamiento en los paramentos excluyendo (mobiliario, ocupación, tableros, pizarra, ...).
 $Tr \leq 0,7 s$
- Aulas y salas de conferencias vacías, pero incluyendo el total de butacas fijas.
 $Tr \leq 0,5 s$
- Comedores y restaurantes vacíos, excluyendo mobiliario, elementos móviles, mantelerías, etc.
 $Tr \leq 0,9 s$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Acabados de interiores paredes, techos y suelos				
Tipo	α			α_m
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	
Hormigón visto	0,03	0,04	0,04	0,04
Hormigón pintado	0,06	0,07	0,09	0,07
Bloque de hormigón visto	0,05	0,08	0,14	0,09
Bloque de hormigón pintado	0,08	0,09	0,10	0,09
Ladrillo cerámico vistos	0,03	0,04	0,05	0,04
Ladrillo cerámico pintados	0,02	0,02	0,02	0,02
Enfoscado de mortero	0,06	0,08	0,04	0,06
Enlucido de yeso	0,01	0,010	0,02	0,01
Placa de yeso laminado	0,05	0,09	0,07	0,06
Placas de escayola	0,04	0,05	0,05	0,05
Piedra	0,01	0,02	0,02	0,02
Madera y paneles de madera	0,08	0,08	0,08	0,08
Parquet	0,04	0,05	0,05	0,05
Tarima	0,08	0,09	0,10	0,09
Tarima sobre rastreles	0,06	0,05	0,05	0,05
Corcho	0,08	0,19	0,21	0,06
Metales	0,015	0,02	0,02	0,02
Revestimientos textiles	0,09	0,14	0,29	0,17
Moqueta, espesor ≤ 10 mm	0,06	0,15	0,30	0,17
Moqueta, espesor ≥ 10 mm	0,15	0,30	0,45	0,30
PVC	0,04	0,05	0,05	0,05
Linoleo	0,03	0,03	0,04	0,03
Caucho	0,04	0,04	0,02	0,03
Terrazo	0,01	0,02	0,02	0,02
Baldosas, plaquetas.	0,01	0,02	0,02	0,02
Vidrio	0,05	0,04	0,03	0,04

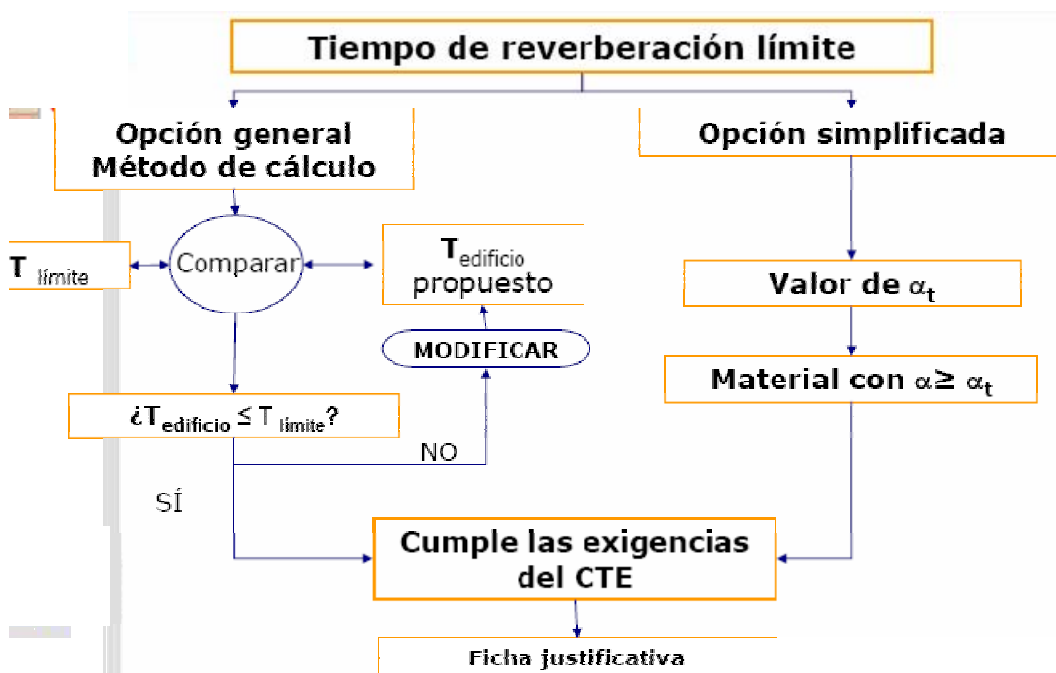
Código	Sección	Revestimiento interior RI	porcentaje de perforación p	Material absorbente acústico AA	HR α_m
T04		YL	0	—	0,05
			0<p<10	MW	0,45 - 0,60
				V	0,45 - 0,60
			10≤p<20	MW	0,45 - 0,70
				V	0,45 - 0,70
			≥20	MW	0,60-0,70
				V	0,60-0,70
		PES	0	—	0,15
			0<p<10	MW	0,40 - 0,60
				V	0,40
			10<p<20	MW	0,60
				V	0,60
			≥20	MW	0,60-0,70
				V	0,60-0,70
T05		PMW	—	—	0,45 - 0,8
		PA	—	—	0,45 - 0,8
		YL	—	MW	0,05
		PES	—	MW	0,06
		PMW	—	—	0,40 - 0,70
		PA	—	—	0,40 - 0,70

Figura 3.15. Tablas extraídas del catálogo de elementos constructivos.



6.2 Opciones de aplicación del diseño

El DB-HR permite la utilización de dos métodos de diseño, uno **simplificado** y uno **general** tal y como se esquematiza en el diagrama de bloques siguiente:



Para la opción general se utiliza la fórmula de Sabine y la opción simplificada consiste en concentrar la absorción en el techo con una distribución uniforme, calculando el α_t del material del techo.

En el Anejo N del DB-HR se dan unas recomendaciones de diseño de aulas y salas de conferencia.

6.3 Ejemplos prácticos de diseño

En el apartado 4 de la presentación de diapositivas incluida en la zona materiales están desarrollados varios ejemplos prácticos de diseño de acondicionamiento acústico cuya lectura es recomendada. Debido a la cantidad de tablas, gráficas y fotografías utilizadas se ha preferido exponer en este formato. En algunos de ellos se hace uso de la aplicación basada en hojas de cálculo ofrecida por el ministerio y que presentaremos en profundidad en unidades siguientes.

En concreto encontrareis los siguientes ejemplos:

- Absorción acústica en DB-HR de una zona común de un colegio.
- Tiempo de reverberación en DB-HR del comedor del colegio.



- Ejemplo general de absorción acústica.
 - Ejemplo general de disminución de ruido en una fábrica.
- Que os servirán de ayuda para la realización del caso práctico.

7. ENUNCIADO PROBLEMAS

Como práctica de los conceptos estudiados en este tema, se proponen a continuación tres problemas. Le invitamos a que los resuelva primero y después compare los resultados obtenidos con las soluciones que se facilitan más adelante.

7.1 Problema 1

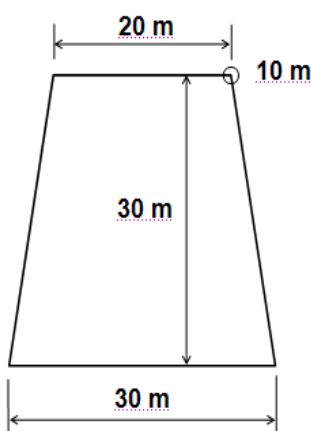
Con una membrana resonante de aluminio de 0,5 mm de espesor se quiere controlar una resonancia en 123 Hz de una habitación de 16 m³ y 76 m². Si en esa frecuencia el tiempo de reverberación original es de 3,2 s, dimensionar el resonador para reducirlo a la mitad. Suponer que $\alpha_{res} = 0,5$.

7.2 Problema 2

En el tratamiento acústico de un ambiente se coloca un panel perforado que cubre una pared de 5 m de largo hasta una altura de 1,8 m. El panel está relleno con material absorbente y a 15 cm de distancia de la pared. Su espesor es de 6 mm y las perforaciones tienen 5 mm de diámetro y están ubicadas en un patrón cuadrícula, separadas 5 cm entre sí. Si el coeficiente de absorción del resonador que se forma resulta de 125, calcular la frecuencia de resonancia y el coeficiente de absorción equivalente a esa frecuencia.

7.3 Problema 3

Un teatro tiene la forma indicada en la figura y posee capacidad para 600 personas. El piso es de bloques de madera, el techo de hormigón pintado y las paredes son de hormigón con revoque de arena y cal. Los asientos son con tapizado de terciopelo.



Material	α_{500}	$\alpha_{1.000}$	$\alpha_{2.000}$
Piso de bloques de madera	0,06	0,09	0,10
Hormigón pintado	0,01	0,02	0,02
Revoque de cal y arena	0,06	0,08	0,04



Indivisibles	α_{500} S	$\alpha_{1.000}$ S	$\alpha_{2.000}$ S
Asientos con terciopelo	0,27 sb	0,30 sb	0,33 sb
Personas sentadas	0,35 sb	0,43 sb	0,46 sb



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

- a) Determinar el tiempo de reverberación para las frecuencias de **500 Hz**, **1.000 Hz**, y **2.000 Hz** en las siguientes situaciones: teatro vacío, ocupado en $\frac{2}{3}$ de la capacidad, y teatro lleno.
- b) Proponer un tratamiento acústico sobre las superficies para lograr **T** óptimo para la palabra.

7.4 Problema 4

En un salón de **20 m × 35 m × 10 m** con $\bar{\alpha} = 0,15$ se desea establecer un campo reverberante de **85 dB**. a) Determinar la potencia acústica y eléctrica necesaria, si los parlantes tienen una sensibilidad de **90 dB** a **1 m** de distancia, con **1 W** de potencia eléctrica aplicada. b) ¿Cuál es el nivel de presión sonora a **2 m** de los parlantes? c) ¿Cuánto tarda en llegar a **82 dB** y a **84 dB**?



8. SOLUCIONES PROBLEMAS

8.1 Problema 1

Determinemos primero la distancia de la membrana a la pared. La densidad superficial es $0,0005 \text{ m} \times 2700 \text{ kg/m}^3 = 1,35 \text{ kg/m}^3$. Entonces:

$$d = \frac{1}{\rho_{\text{sup}}} \left(\frac{60}{f} \right)^2 = 17,6 \text{ cm}.$$

Ahora obtengamos la superficie requerida. Para ello tengamos en cuenta que

$$T \cong 0,161 \frac{V}{\bar{\alpha} S}.$$

Entonces, para reducir T a la mitad bastará con aumentar $\bar{\alpha}$ al doble. Tenemos

$$\bar{\alpha} = 0,16 \frac{V}{T \cdot S} = 0,0105.$$

Requerimos ahora que

$$\frac{\bar{\alpha} (S - S_{\text{res}}) + \alpha_{\text{res}} \cdot S_{\text{res}}}{S} = 2\bar{\alpha},$$

de donde

$$S_{\text{res}} = \frac{\bar{\alpha} S}{\alpha_{\text{res}} - \bar{\alpha}} = 1,63 \text{ m}^2.$$

Esta superficie se consigue con una membrana de $1 \text{ m} \times 1,63 \text{ m}$. En un caso práctico podría mejorarse el aspecto estético con una pintura o póster adherido a la lámina de aluminio.

8.2 Problema 2

Si bien hay numerosas perforaciones, podemos asimilarlas a una sola de sección igual a la suma de todas las secciones. Por cada cuadrícula se agrega una perforación. El área total de perforaciones es, entonces,

$$A = \frac{1,8}{0,05} \cdot \frac{5}{0,05} \cdot \pi \cdot \frac{(0,005)^2}{4} = 0,071 \text{ m}^2.$$

El volumen encerrado es

$$V = 1,8 \cdot 5 \cdot 0,15 = 1,35 \text{ m}^3.$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Entonces la frecuencia resulta

$$f = 55 \sqrt{\frac{A}{V \cdot l}} = 162 \text{ Hz}.$$

Para calcular el coeficiente de absorción equivalente, tengamos en cuenta que el área de Helmholtz es de **0,71 m²**, pero el área total del panel es de **1,8 m · 5 m = 9 m²**. Entonces

$$\alpha = \frac{0,071 \cdot 125}{9} = 0,98.$$

Debe destacarse que esta absorción se da en un rango muy limitado de frecuencias alrededor de 162 Hz, de modo que sólo resulta útil para controlar una resonancia importante en esa frecuencia. De no ser así, de hecho podría significar una importante deficiencia acústica, ya que habría una frecuencia virtualmente eliminada, es decir, una muesca en la respuesta en frecuencia del recinto. En caso de que la placa perforada se hubiera puesto al solo efecto de proteger el material absorbente, esto podría corregirse dejando abierto el volumen, por ejemplo eliminando la cubierta superior, o sustituyéndola por una tela de punto suelto.

8.3 Problema 3

a) El volumen se calcula como

$$V = \frac{20 + 30}{2} \cdot 30 \cdot 10 \text{ m}^3 = 7.500 \text{ m}^3.$$

Calculemos la absorción total:

$$\bar{\alpha} S = \sum \alpha_i S_i$$

Los valores de los coeficientes de absorción en el caso de las superficies y de las absorciones en el de los asientos y las personas se obtienen de la figura. Por ejemplo, para la frecuencia de 500 Hz y la sala con 2/3 de las localidades ocupadas (400 personas sentadas y 200 asientos vacíos), el procedimiento de cálculo es

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} S|_{500 \text{ Hz}} &= \underbrace{\frac{20 + 30}{2} \cdot 30 \cdot (0,06 + 0,01) + \left(20 + 30 + 2 \cdot \sqrt{30^2 + 5^2} \right) \cdot 10 \cdot 0,06}_{\text{SUPERFICIES}} + \\ &\quad \underbrace{400 \cdot 0,35 + 200 \cdot 0,27}_{\text{PERSONAS Y ASIENTOS}} \\ &= 119 + 194 = 313 \text{ sabine.} \end{aligned}$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Es interesante observar que debido a la escasa absorción de las superficies, la mayor absorción corresponde al rubro de asientos y personas.

Al valor anterior hay que agregarle la absorción en el aire. A **500 Hz**, y suponiendo una temperatura de **22 °C** y humedad del **60 %**, mirando en tabla de la página 28 por ejemplo ($m = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$), para obtener la absorción del aire o usando una de las formulas expuestas en el documento, y finalmente, sustituyendo en la ecuación,

$$T_{500\text{Hz}} = 0,161 \frac{7500}{12 + 313} = 3,7 \text{ seg}.$$

Con el mismo procedimiento repetimos el cálculo para las otras situaciones, obteniendo la siguiente tabla:

	T_{500} [seg]	$T_{1.0}$ [seg]	$T_{2.0}$ [seg]
Sala vacía	4,0	3,3	3,4
400 personas	3,7	2,9	3,0
600 personas	3,5	2,7	2,8

Se puede apreciar que no existen grandes diferencias entre los distintos grados de ocupación de la sala. Ello se debe a que los personas sentadas absorben sólo un poco más que los asientos de terciopelo. La selección de este material permite independizar bastante el tiempo de reverberación del estado de ocupación.

b) De acuerdo a la curva **b**, el tiempo de reverberación óptimo para la palabra es de **0,78 seg**, que se encuentra muy por debajo del obtenido según la tabla anterior. Suponiendo que el tiempo óptimo se dará para el teatro lleno, podemos plantear

$$Tr = 0,161 \frac{V}{4Vm + (\alpha S)_{\text{personas y asientos}} + \bar{\alpha}_{\text{superficies}} S},$$

Ecuación de la cual pretendemos obtener el valor de $\bar{\alpha}$ para obtener dicho **Tr**. Haremos el cálculo sólo para **500 Hz**. Sustituyendo valores,



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

$$0,78 = 0,161 \frac{7500}{4 \cdot 7500 \cdot 0,0004 + 600 \cdot 0,35 + \bar{\alpha}_{\text{superficies}} S} ,$$

de donde resulta

$$\bar{\alpha}_{\text{superficies}} S = 1.320 \text{ sabine} .$$

Dado que la superficie es

$$S = 2 \cdot \frac{20+30}{2} \cdot 30 + \left(20 + 30 + 2 \cdot \sqrt{30^2 + 5^2} \right) \cdot 10 = 2608 \text{ m}^2$$

resulta que el coeficiente de absorción promedio debería ser

$$\bar{\alpha} = 0,51 .$$

Este valor es bastante grande, lo cual muestra las dificultades para realizar un teatro de estas dimensiones para la voz. Para lograr dicha absorción podría agregarse a un **73 %** de las superficies fieltro de lana de vidrio de **50 mm** de espesor y **14 kg/m³** de densidad, que posee un coeficiente de absorción de **0,70**. Ello implicará tapizar todo el techo y las paredes con dicho material, agregando alguna cubierta acústicamente transparente (ver capítulo sobre materiales acústicos) como podrían ser placas perforadas o listones de madera paralelos y con un espacio entre pares sucesivos.

Debe observarse que con el teatro vacío el tiempo de reverberación resultará mayor que el óptimo, por lo cual podría verse algo deteriorada la inteligibilidad de la palabra. Ello es preferible a que con el teatro lleno el sonido se escuche demasiado débil, lo cual también conduce a una inteligibilidad pobre.

8.4 Problema 4

a) En primer lugar calculemos

$$S = 2 \cdot (20 \cdot 35 + 20 \cdot 10 + 35 \cdot 10) \text{ m}^2 = 2.500 \text{ m}^2 .$$

$$R = \frac{\alpha \cdot S}{1 - \alpha} = \frac{0,15 \cdot 2500}{0,85} \text{ m}^2 = 441 \text{ m}^2 .$$

$$\rho_0 c = 1,18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 344 \frac{\text{m}}{\text{seg}} = 406 \text{ rayl} .$$

$$P_{\text{ef REV}}^2 = (20 \mu\text{Pa})^2 \cdot 10^{\frac{85}{10}} = 0,126 \text{ Pa}^2 .$$

Entonces, dado que



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

$$P_{\text{ef REV}}^2 = \rho_0 c \frac{4}{R} P_{\text{ot}} ,$$

Resulta

$$P_{\text{ot}} = 0,126 \text{ Pa}^2 \frac{441 \text{ m}^2}{4 \cdot 406 \text{ rayl}} = 34,3 \text{ mW} .$$

Para determinar la potencia eléctrica requerida tengamos en cuenta que la sensibilidad de los parlantes se mide en campo libre, por lo cual, si **Pot** es la potencia acústica, entonces

$$\left(20 \cdot 10^{-6}\right)^2 10^{\frac{90}{10}} = 406 \frac{1}{4\pi (1)^2} P_{\text{ot}}$$

de donde

$$P_{\text{ot}} = 12,4 \text{ mW}$$

Dado que la potencia eléctrica que se le está suministrando al parlante es de 1 W, su rendimiento energético es de sólo un 1,24 %. Por lo tanto, para obtener 34,3 mW se requiere una potencia eléctrica de

$$P_{\text{ot el}} = \frac{34,3 \text{ mW}}{0,0124} = 2,8 \text{ W} .$$

b) Ahora aplicamos la ecuación completa:

$$P_{\text{ef}}^2 = 406 \text{ rayl} \left(\frac{1}{4\pi (2 \text{ m})^2} + \frac{4}{441 \text{ m}^2} \right) 0,0334 \text{ W} = 0,393 \text{ Pa}^2 .$$

$$\text{NPS} = 10 \log_{10} \frac{0,393}{\left(20 \cdot 10^{-6}\right)^2} = 90 \text{ dB} .$$

c) Si partimos del tiempo que tarda el nivel de presión sonora en llegar a **3 dB** por debajo del valor final, deberá ser, por ecuación,

$$1 - e^{-\frac{\bar{\alpha} S}{4V} c t_{-3\text{dB}}} = 10^{-\frac{3}{10}} ,$$

de donde

$$t_{-3 \text{ dB}} = 0,151 \text{ seg} .$$

Análogamente,

$$t_{-1 \text{ dB}} = 0,343 \text{ seg} .$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Hagamos algunos comentarios. De a) vemos que para tener 85 dB se requiere una potencia acústica pequeña. La potencia eléctrica es mucho mayor, debido al bajo rendimiento de los parlantes, pero de todas maneras es moderada, ya que 85 dB no es un nivel de presión sonora desmesurado. En b) se pone de manifiesto el hecho de que cerca de la fuente hay un predominio del campo directo por sobre el reverberante. Finalmente, de c) se puede concluir que el salón no responderá igual a los transitorios muy rápidos que a los sonidos prolongados. Los sonidos prolongados parecerán más sonoros debido a que el campo correspondiente tiene tiempo de alcanzar el estado estacionario.

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA (T4)

PROYECTOS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO. PARTE 1ª.

Acústica Arquitectónica

Edición 2009-2010

Profesor: Juan M. Navarro

UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN ANTONIO DE MURCIA



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Contenido

1. AISLAMIENTO DEL SONIDO	3
1.1 Planteamiento general	3
1.2 Materiales para el aislamiento acústico	6
2. AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO.....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Índices de aislamiento a ruido aéreo	9
2.3 Aislamiento de paredes simples	14
2.4 Aislamiento de paredes múltiples	21
2.5 Pérdida de transmisión mixta o aislamiento mixto.....	26
2.6 Ejemplo de aislamiento a ruido aéreo.....	27
3. AISLAMIENTO A RUIDO POR VIBRACIONES.....	28
3.1 Introducción.....	28
3.2 Índices de aislamiento a ruido de impactos y vibraciones.....	29
3.3 Amortiguamiento del ruido transmitido por vía sólida.....	31
3.4 Materiales y tipos de elementos de amortiguación.....	35
4. LAS MEJORAS DE AISLAMIENTO EN EL DB-HR.....	37
4.1 Introducción.....	37
5. DISEÑO DE SOLUCIONES DE AISLAMIENTO SEGUN DB-HR: OPCIÓN SIMPLIFICADA	40
6. ENUNCIADO PROBLEMAS	41
6.1 Problema 1	41
6.2 Problema 2	41
6.3 Problema 3	41
6.4 Problema 4	41
7. SOLUCIONES PROBLEMAS	42
7.1 Problema 1	42
7.2 Problema 2	42
7.3 Problema 3	43
7.4 Problema 4	44

1. AISLAMIENTO DEL SONIDO

El objetivo principal de este tema es describir las técnicas que debemos aplicar para el diseño de proyecto bajo el DB-HR con respecto al **Aislamiento Acústico**. En esta primera parte se definirán todos los parámetros exigidos por la legislación tanto para ruido aéreo como a ruido de impactos. Además se expondrá la metodología para el diseño de soluciones constructivas bajo el método simplificado que propone el CTE. Recordamos que trata el estudio de la protección contra los ruidos y vibraciones que se deseen evitar en los recintos habitables.

1.1 Planteamiento general

En el proceso de diseño de un recinto se ha de estudiar:

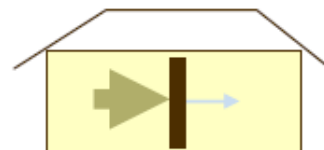
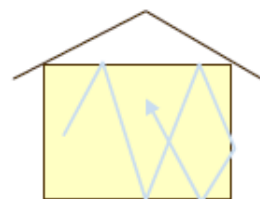
- Acondicionamiento
- Aislamiento

Acondicionamiento

- Importancia proceso absorción energía sonora
- Estudio propagación y comportamiento del campo sonoro
- Estudio propiedades absorbentes de los materiales

Aislamiento

- Importancia transmisión energía sonora
- Estudio propiedades estructurales de los materiales
- Estudio propiedades absorbentes de los materiales
- Agrupa a todas las medidas para controlar el nivel de ruido que entra en un recinto

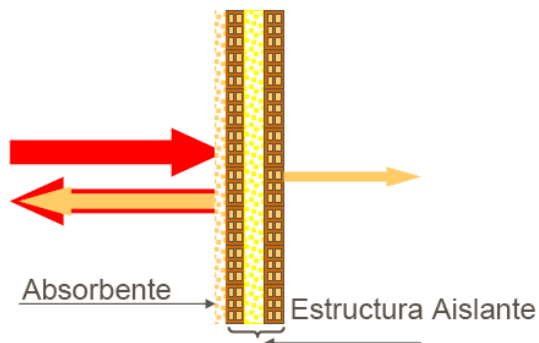


El aislamiento del sonido consiste en impedir su propagación por medio de obstáculos reflectores. Como ya se indicó en la unidad didáctica anterior (Reflexión del sonido), siempre que se trata de lograr un gran factor de reflexión hay que interponer en el camino del sonido un medio cuya impedancia Z sea lo más diferente posible a la del medio que conduce el sonido; por tanto, es lógico tratar por un lado el aislamiento del sonido en el aire u otro medio gaseoso (baja impedancia) y, por otro, el aislamiento en sólidos (alta impedancia).

Implica controlar:

- Todas las posibles vías de transmisión (ruido procedente del exterior)
- Posibles fuentes de ruido del interior de la sala (Alumbrado, sistemas de ventilación,...)

Para controlar la transmisión de sonido a un local objeto de aislamiento acústico hay que tener en cuenta que el mecanismo de transmisión está formado por: fuente de ruido, canal de transmisión y local receptor.





Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

La fuente se caracteriza por su localización, así como por la naturaleza y descripción del sonido que produce (tipo de fuente, intensidad sonora, espectro de frecuencias, variación temporal...)

El canal de transmisión está constituido por todos los elementos a través de los cuales llega el sonido desde la fuente al receptor. Estos elementos son:

- paredes (medianeras, fachadas, tabiques interiores...)
- forjados (suelos, techos, cubiertas)
- elementos estructurales (vigas, pilares, cimentaciones...)
- otros espacios (patios, escaleras, huecos ascensor, falsos techos, locales contiguos)
- puertas, ventanas...

El tramo final del canal de transmisión está constituido por los elementos constructivos que delimitan el **local receptor** y es la vibración de estos elementos la que produce las ondas sonoras en el mismo.

Según la forma de producirse y propagarse, el ruido puede ser:

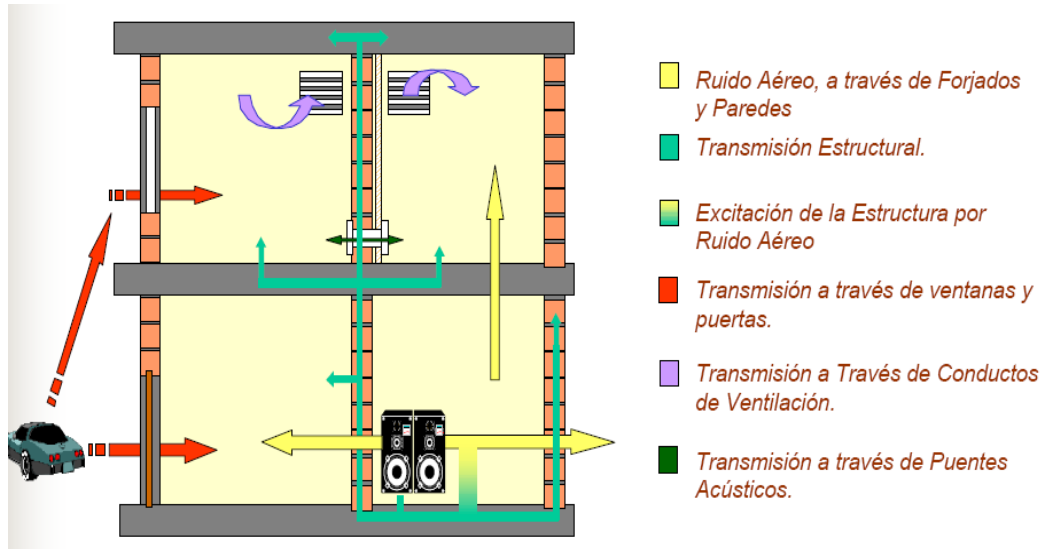
- **AÉREO:** llega a los cerramientos del local receptor por el aire circundante y hace que entre en vibración, con independencia de la forma de producirse. Diseño de los adecuados cerramientos entre el espacio a aislar y los colindantes donde están ubicadas las fuentes de ruido, con el fin de reducir la energía acústica transmitida
- **DE IMPACTO:** se produce un golpe de corta duración sobre los cerramientos del local receptor y los hace entrar en vibración.
- **DE VIBRACIÓN:** la vibración de otros elementos (máquinas, motores...) es transmitida a los cerramientos del local receptor.

Los dos anteriores se engloban en un grupo donde el objetivo es evitar que los ruidos pongan en vibración cualquier elemento en contacto con la fuente de ruido, y minimizando que la vibración se propague

El conocimiento exhaustivo, tanto de las fuentes de ruido como de sus posibles vías de comunicación con el local receptor, nos permitirá dar a éste el adecuado nivel de aislamiento para proteger a sus ocupantes del ruido producido por dichas fuentes.

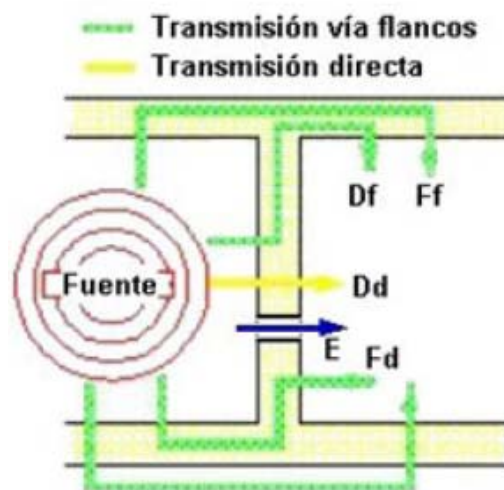
- Para el control acústico del ruido se puede actuar sobre:
- fuentes del ruido
- local o espacio donde se produce el ruido (inicio del canal de transmisión)
- posibles vías de transmisión del ruido al local receptor (canal de transmisión)
- local receptor (final del canal de transmisión)
- personas o elementos receptores

EJEMPLOS DE VIAS DE TRANSMISIÓN SONORA EN LOS EDIFICIOS



- Existen varias Vías de Transmisión del Sonido
- Vía Directa
 - o A través de elementos de separación
 - o D_d, E
- Vía Indirecta – Flancos
 - o Vías $\neq$ a la partición común
 - o Se debe a la vibración de los elementos de flancos (Tx estructural)
 - o D_f, F_d, F_f

La notación utilizada en la figura siguiente es la recomendada para la aplicación del DB-HR.





Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

El estudio de los mecanismos de transmisión de los ruidos, ya sean aéreos o de vibración o impacto, nos permitirá sacar conclusiones respecto a las barreras a utilizar para evitar parte de dicha transmisión, o lo que es equivalente, la naturaleza del mecanismo de aislamiento a utilizar.

1.2 Materiales para el aislamiento acústico

Un **material aislante** es el que impide la propagación del sonido de un recinto a otro. Su pérdida de transmisión es elevada.

Los materiales empleados para aislar a **ruido aéreo**, que es el sonido no deseado transmitido por el aire, son ladrillos de diferentes tipos, como por ejemplo de 1/2 pie o 1 pie, huecos, macizos, etc. Así mismo, se emplean otros materiales como yeso, cartón-yeso, fibras de diferentes densidades, así como otros muchos tipos de materiales. Un factor importante en la elección de materiales para paredes maestras con relación a su aislamiento acústico a ruido aéreo, es la masa de la pared por metro cuadrado de superficie como veremos en apartados siguientes.

Desde el punto de vista del ruido aéreo, las paredes maestras y las fachadas de los edificios que se hacen pesadas y gruesas por razones de solidez, pueden asegurar suficiente aislamiento acústico a ruido aéreo (50-55 dB); sin embargo, esas paredes muy frecuentemente sirven para transmitir vibraciones a través de la estructura. Los métodos más simples de defensa son el uso de materiales aislantes en la estructura de los edificios y el empleo de rellenos de materiales densos o plásticos (gomas, corcho). El primer método reduce la posibilidad de la transmisión indirecta de ruidos por medio de vibraciones longitudinales, el segundo impide la distribución de las vibraciones longitudinales y de las flectoras; el espesor de la capa elástica puede elegirse entre 25 y 40 mm, algunas veces se emplean muelles de metales especiales como rellenos elásticos.

Un método más efectivo para luchar contra los ruidos que penetran a través de los elementos de la construcción de un edificio, es tener una separación total entre la estructura del edificio y el recinto que debe protegerse del ruido. Este método se emplea cuando se necesita un aislamiento muy bueno, como locales de actividades calificadas, en estudios de radio, televisión, etc. Tal sistema de protección, conocido como "flotante", tiene al recinto totalmente aislado de los elementos sustentadores de la construcción y descansando sobre artificios de plástico o suspendidos de ellos. La atenuación introducida por la conexión oscilante da como resultado una gran reducción de ruido aéreo, de impacto y vibratorio.

Si es necesario aislar el recinto del ruido de maquinaria, se recomienda que además de montar la misma en unos cimientos separados deberá colocarse en un recinto separado. Las paredes se hacen de un material opaco al sonido (ladrillo) con un tratamiento interno de materiales absorbentes sonoros.

Las paredes interiores no pueden ser macizas y gruesas tanto como queramos, debido a su elevado costo económico y a la imposibilidad de colocar cargas pesadas en las partes de soporte de carga de la estructura. Por lo tanto, surge la necesidad de aumentar el aislamiento de las paredes con masas comparativamente pequeñas. Esto se realiza mediante el uso de construcciones de **capas múltiples y de materiales porosos**. Es deseable que dos elementos de pared formando una construcción compleja, siempre que sea posible, sean de diferentes materiales, uno de otro en masa, espesor y elasticidad. Tales medidas reducen la posibilidad de la aparición de resonancias que causan depresiones en la característica de frecuencia del aislamiento. En el caso de una pared ligera de dos capas se puede aumentar a un nivel similar al de una pared grande y sólida colocando en la cavidad una capa de material poroso blando. Aparte del aislamiento adicional, esto introduce un desorden dentro del sistema, que reduce las resonancias mejorando el rendimiento del sistema.

Los suelos, que como muchas paredes son fronteras límites, se distinguen de ellas por el hecho de que están más expuestos a los golpes (pisotones, movimientos de muebles, etc). Como se observa en la transferencia de sonido aéreo, los suelos no son diferentes de las paredes y su aislamiento aumenta con el incremento de la masa. Los suelos normales con un peso de 200 - 300 Kg/m² tienen una pérdida de



transmisión de 45 - 50 dB. Sin embargo, este aislamiento es insuficiente para protegerlo contra los impactos y se tienen que tomar medidas adicionales.

Algunos caminos posibles de transmisión sonora a través de una estructura son:

- Directa a través de la pared común,
- Por flancos a través tanto de elementos comunes como de otros elementos de la partición.

El techo suspendido reduce la transmisión directa a través del suelo pero no la influencia de la transmisión por flancos. El suelo flotante reduce el impacto generado por la fuente y disminuye la transmisión por flancos a través del suelo. Un aislamiento adicional de las paredes del recinto reduciría el remanente de la señal directa y la transmisión por flancos. Un techo flotante, suspendido sobre resortes, puede aumentar el aislamiento si su masa no es muy pequeña, si la capa de aire entre el techo y el suelo tiene un espesor mínimo de 10 cm (en el caso de que sea posible), y si el puente del techo flotante tiene ranuras ocupadas con rellenos elásticos donde se apoyan las paredes. En este caso, se crea una partición normal de dos capas, cuyo aislamiento se puede aumentar todavía más colocando una hoja de material poroso en el espacio aéreo (fibra de vidrio o fieltro).

Un suelo flotante presenta una protección contra los **impactos de ruido**, debiendo estar el suelo completamente aislado de la pared y del verdadero suelo soporte de carga. Por esto el falso suelo se coloca sobre rellenos blandos resistentes (fibra de vidrio, corcho o caucho, gomas), separado de la pared por rellenos similares. Así, con un suelo flotante y debajo de un techo flotante, el suelo se vuelve como una construcción de tres capas, cuyo aislamiento total es mucho más elevado que cualquier suelo ordinario. Finalmente, la transmisión del impacto se puede reducir todavía más si la superficie del suelo se cubre de materiales blandos. En particular donde el suelo está cubierto de una alfombra de caucho esponjoso, el aumento del aislamiento es de 14 dB, y con varias capas es de 20 dB.

2. AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO

2.1 Introducción

El sonido transmitido por el aire es lo que normalmente se llama **ruido aéreo**, y así lo denominaremos en adelante.

La transmisión de los ruidos aéreos a un local se realiza a través de los cerramientos de separación del local receptor, ya sea con el medio exterior (fachada y cubierta) o con locales contiguos (medianeras, tabiquería interior y forjados).

Los mecanismos de aislamiento a ruido aéreo tienen como objeto **reducir al mínimo la energía de la onda sonora** que se produce en el local receptor, bien mediante el diseño adecuado del cerramiento a través del cual llega el ruido, o bien disminuyendo la energía de la onda sonora antes de que incida sobre el mismo.

Si colocamos una barrera entre dos locales para conseguir un aislamiento al ruido aéreo, la transmisión del ruido de un local a otro se puede realizar por distintos caminos; como se ve en la Fig. 4.1.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

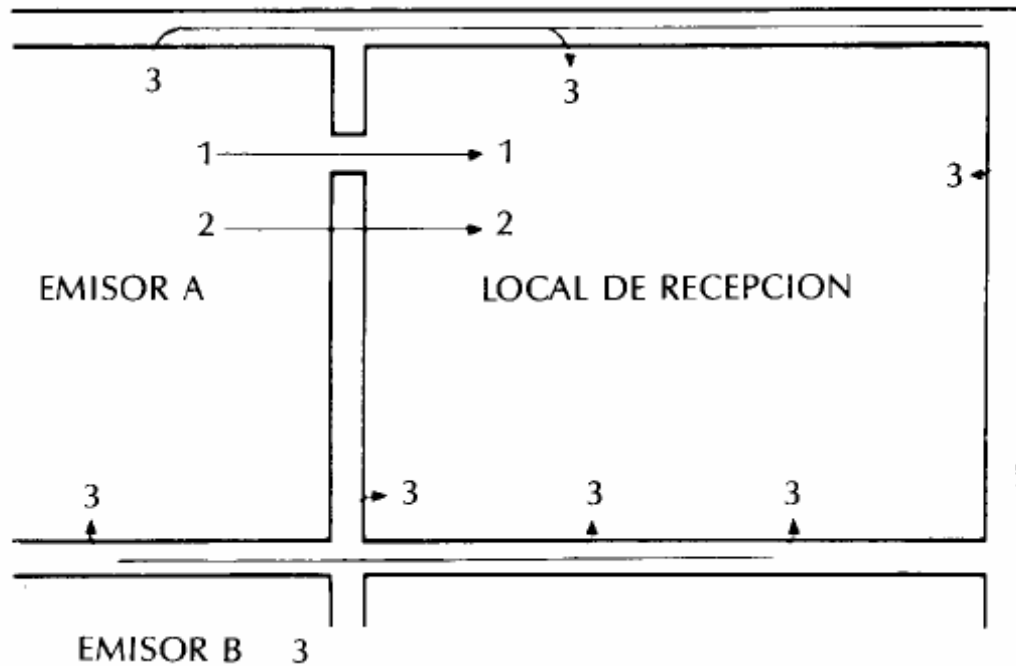


Figura 4.1. Caminos de transmisión del ruido.

a) Por vía directa (1) y (2), que se puede descomponer en dos causas principales.

- La porosidad a través de fisuras e intersticios.
- El efecto de diafragma, es decir, flexión bajo el efecto de la presión sonora, como en una membrana.

b) Por vías indirectas, como conductos y paredes adyacentes (3).



2.2 Índices de aislamiento a ruido aéreo

Hay diversos índices normalizados para cuantificar el aislamiento al ruido aéreo. Los que vamos a utilizar a lo largo del curso se encuentran resumidos en la siguiente figura según la norma ISO utilizada para su obtención y los definidos para el DB-HR. Indicar que todos los índices son dependientes de la frecuencia.

<u>ISO-140</u>	<u>ISO-717</u>	<u>CTE-HR</u>	
– Medida	- Evaluación	- A.A. Global – dBA	
– Función Frecuencia	- Valores Globales		
– Laboratorio o “in situ”			
		<u>Exigencias</u>	<u>Magnitudes</u>
		<u>aislamiento</u>	<u>intermedias</u>
D	$D_{nT,w}$	$D_{nT,A}$	R_A
D_n	$D_{2m,nT,w}$	$D_{2m,nT,Atr}$	$R_{Dd,A}$
D_{nT}	$R_w(C;Ctr)$	R_{Atr}	$R_{Fd,A}$
$D_{2m,nT}$	$R'_w(C;Ctr)$		$R_{Df,A}$
$R - R'$			$R_{Ff,A}$



Figura 4.2. Índices de aislamiento.

Veamos los más importantes y utilizados:

- *Aislamiento acústico bruto* o Diferencia de niveles entre recintos. In situ. (D): Es la diferencia de niveles de presión acústica que existe entre el nivel acústico del local donde está la fuente (local emisor) y el del local donde se recibe el sonido (local receptor).

Se calcula mediante la expresión:

$$D = L_1 - L_2 (dB)$$

Este valor puede corresponder a una sola frecuencia, a una banda de frecuencia o al espectro total de frecuencias.

- *Aislamiento acústico normalizado* o Diferencia de niveles normalizada. In situ. (D_n): Es la diferencia de niveles de presión acústica entre el local emisor y el receptor; pero teniendo en cuenta la influencia que, sobre el nivel, ejerce la reverberación. En el local receptor, si existe una reverberación elevada, el valor del nivel acústico L_2 es mayor que el que cabría esperar debido al aislamiento producido por la pared, con lo que el aislamiento acústico se reduce. Lo contrario ocurrirá en el caso de elevada absorción: baja reverberación.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Para tener en cuenta esta incidencia, se efectúa una corrección de los resultados considerando que una habitación con un amueblamiento normal posee un tiempo de reverberación de 0,5 segundos, o, según otra normativa, un área de absorción equivalente de 10 m².

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{10}{A} (dB)$$

En la práctica, se utiliza la reverberación en el local receptor pues se mide directamente con un aparato de medida (UNE EN ISO 140-4). En ese caso se le conoce como Aislamiento acústico estandarizado o diferencia de niveles estandarizada (D_{nT}). Por tanto, el aislamiento acústico normalizado, para una frecuencia determinada entre dos locales de una vivienda, se calcula mediante la expresión:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{0,5} (dB)$$

siendo:

T = Tiempo de reverberación del local receptor para la frecuencia considerada.

A = Área de absorción equivalente del local receptor para la frecuencia considerada.

Es el índice de niveles de exigencia del DB-HR.

- *Índice de reducción acústica.* (R) o (PT): Este índice se utiliza generalmente para medidas en laboratorio (cámaras de transmisión) y se define como:

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} (dB)$$

siendo W_1 y W_2 las potencias acústicas incidentes sobre la muestra y transmitida por ella. En el caso de campo acústico difuso, que es como se ensaya en el laboratorio, se puede evaluar por la fórmula:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} (dB)$$

siendo:

S = Superficie de la muestra a ensayar (m²).

A = Área de absorción equivalente de la sala de recepción (m²).

Cuando la medición se realiza in situ bajo la norma (UNE EN ISO 140-4) se le conoce como índice de reducción acústica aparente (R').

Existe una relación entre las magnitudes D_{nT} y R' mediante las características geométricas del recinto:

$$D_{nT} = R' + 10 \cdot \lg \frac{0,16 \cdot V}{T_0 \cdot S_S} = R' + 10 \cdot \lg \left(\frac{0,32 \cdot V}{S_S} \right) [dB]$$

Donde, S_S = Superficie de elemento separador

V = Volumen local receptor

$T_0 = 0,5$ s



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Po ultimo, nos encontramos con

- *Diferencia de niveles estandarizada en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior. In situ.* ($D_{2m,nT}$): Aislamiento acústico a ruido aéreo (dB) cuando la medida del nivel de ruido exterior, $L_{1,2m}$, se realiza a dos metros de la fachada:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \frac{T}{0,5} (dB)$$

Todas la magnitudes anteriores dependen de la **frecuencia** y para poder compararlos con las exigencias del DB-HR debemos caracterizar el aislamiento acústico mediante un único valor, para ello usaremos el índice global ponderado que representa el valor en dB a 500 Hz de una curva de referencia que se desplaza para ajustarse a los valores de aislamiento obtenidos experimentalmente, según especifica la norma UNE EN ISO 717-1. Tendremos por ejemplo; D_w , R'_w , $D_{nT,w}$, $D_{2m,nT,w}$.

Los índices globales dependen del espectro acústico de la fuente de ruido; por lo que aparecen los **términos de corrección espectral**: C , C_{tr} (dB)

C	Término de adaptación espectral para ruido rosa incidente o ruido de tráfico ferroviario	Elementos constructivos Aislamiento acústico entre dos viviendas
C_{tr}	Término de adaptación espectral del índice de reducción acústica para ruido de automóviles y de aeronaves	Elementos constructivos Aislamiento de fachadas

Se obtienen del método de la curva de referencia de la norma UNE EN ISO 717-1. Esto lo estudiaremos en Tema 6.

La magnitud global se expresa de la siguiente manera:

$$R_w (C; C_{tr})$$

Ejemplo:

En un catálogo de elementos constructivos podríamos encontrar un aislamiento ensayado en laboratorio (UNE EN ISO 140-3) de valor:

$$R_w(C; C_{tr}) = 52(-1;-4) \rightarrow \begin{matrix} R_w + C = 51 \text{ dB} \\ R_w + C_{tr} = 48 \text{ dB} \end{matrix}$$

Se entiende por pared simple la que no está formada por varias paredes independientes, es decir, no es necesario que sea una pared homogénea (de un solo material), sino que debe cumplir que los puntos situados sobre una misma normal no modifiquen su distancia mutua cuando la pared realice vibraciones.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Si observamos la Figura 4.2 anterior podemos ver que los índices en el DB-HR se expresan en dB(A).

Exigencias de aislamiento	$D_{nT,A}$, $D_{2m,nT,Atr}$, R_A
Magnitudes intermedias	R_A , $R_{Dd,A}$, $R_{Fd,A}$, $R_{Df,A}$, $R_{Ff,A}$

Este Índice global en dBA, lleva incorporado el término de adaptación espectral correspondiente según el ruido predominante sea tráfico rodado, trenes, aviones, etc.

A la hora de certificar o comparar entre niveles medidos y niveles exigidos y/o proyectados El DB-HR acepta como aproximación, para expresar las magnitudes en dBA:

$D_{nT,w} + C$	aproximación de	$D_{nT,A}$	entre recintos interiores
$D_{2m,nT,w} + C$	aproximación de	$D_{2m,nT,A}$	entre un recinto y el exterior (trenes)
$D_{2m,nT,w} + C_{tr}$	aproximación de	$D_{2m,nT,Atr}$	entre un recinto y el exterior (automóviles)

Para los elementos constructivos:

$R_w + C$	aproximación de	R_A	entre recintos interiores
$R_w + C_{tr}$	aproximación de	R_{Atr}	entre un recinto y el exterior (automóviles)



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Para obtener matemáticamente los índices de aislamiento expresados en dBA se utilizan las siguientes expresiones:

Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, entre recintos interiores, $D_{nT,A}$

Es la valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada, entre recintos interiores, D_{nT} , para ruido rosa

$$D_{nT,A} = -10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{(L_{Ar,i} - D_{nT,i})/10} \quad [\text{dBA}]$$

$D_{nT,i}$: diferencia de niveles estandarizada en la banda de frecuencia i , (dB);

$L_{Ar,i}$: valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i , (dBA);

i : recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5 kHz

Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior para ruido rosa, $D_{2m,nT,A}$

$$D_{2m,nT,A} = -10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{(L_{Ar,i} - D_{2m,nT,i})/10} \quad [\text{dBA}]$$

Es la valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada de una fachada, una cubierta o un suelo en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT}$, para ruido rosa

$L_{Ar,i}$: valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i , (dBA);

Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior para ruido de automóviles, $D_{2m,nT,Atr}$

Es la valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada de una fachada, una cubierta o un suelo en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT}$, para ruido exterior de automóviles

$$D_{2m,nT,Atr} = -10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{(L_{Atr,i} - D_{2m,nT,i})/10} \quad [\text{dBA}]$$

$L_{Ar,i}$: valor del espectro normalizado del ruido de automóviles, ponderado A, en la banda de frecuencia i , (dBA);



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

De la misma forma cuando el ruido predominante es:

Tráfico ferroviario, estaciones ferroviarias $D_{2m,nT,Art}$

Espectro normalizado de ruido de tráfico ferroviario o de estaciones ferroviarias

Aeronaves $D_{2m,nT,Aat}$

Espectro normalizado de ruido de aeronaves

Los espectros de ruido normalizados se pueden encontrar en el DB-HR.

Finalmente mostramos una tabla con un resumen de las magnitudes de aislamiento a ruido aéreo:

Relativas a elementos constructivos (Laboratorio)				Relativas a recintos (In Situ)			
Nombre	Por frecuencias	Global	Pond. A	Nombre	Por frecuencias	Global	Pond. A
Índice de reducción acústica	R	R_w	R_A R_{Atr}	Índice de reducción acústica aparente	R'	R'_w	R'_A R'_{Atr}
				Diferencia de niveles estandarizada	D_{nT}	$D_{nT,w}$	$D_{nT,A}$
				Diferencia de niveles estandarizada en fachadas	$D_{2m,nT}$	$D_{2m,nT,w}$	$D_{2m,nT,A}$ $D_{2m,nT,Atr}$

2.3 Aislamiento de paredes simples

Se entiende por **pared simple** la que no está formada por varias paredes independientes, es decir, no es necesario que sea una pared homogénea (de un solo material), sino que debe cumplir que los puntos situados sobre una misma normal no modifiquen su distancia mutua cuando la pared realice vibraciones.

Para obtener un buen aislamiento acústico, estas paredes se deben construir de acuerdo con los siguientes puntos:

- Suficientemente pesadas.
- Débilmente rígidas.
- Estancas de aire.



a) Ley de masa y de frecuencia

Para una pared simple, la ley de masa y frecuencia indica que el aislamiento acústico es mayor cuanto mayor sea su masa superficial (masa por unidad de superficie), es decir, más pesadas, y también es mayor para frecuencias altas.

La expresión de esta ley es:

$$R = 20 \log \frac{\omega \cdot m}{2Z} \text{ (dB)}$$

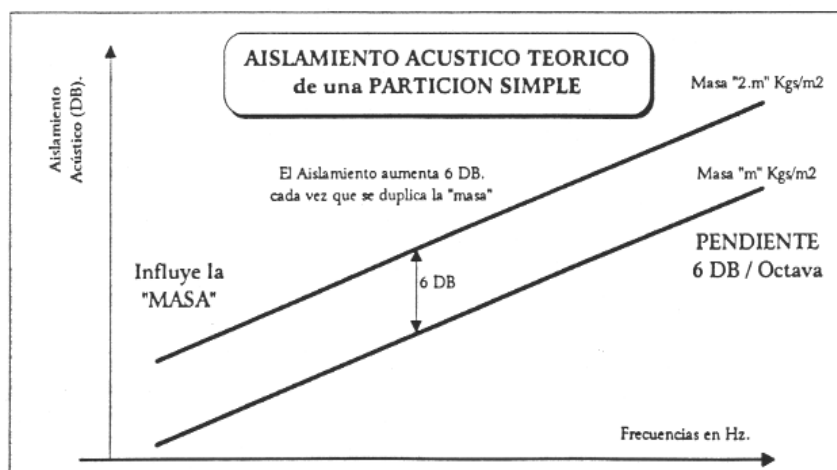
siendo, ω = Pulsación [$\omega = 2\pi f$] (Hz).

m = Masa superficial (kg/m^2).

Z = Impedancia acústica del aire (Rayls).

Esto, pasado a una gráfica semilogarítmica, nos da el aislamiento acústico en función de la masa superficial, para una serie de frecuencias dadas.

Teóricamente, esta ley nos dice que **doblando la masa o la frecuencia se consigue una mejora de 6 dB** en el aislamiento.



Esta ley es experimental, por tanto no es absoluta, sino aproximada, si bien se utiliza mucho para dar una primera idea del comportamiento acústico de una pared. Solo se cumple en un determinado intervalo de frecuencias conocida como “Zona controlada por masa” y sufre una disminución importante del aislamiento en la frecuencia de resonancia, f_0 y en la frecuencia de crítica o de coincidencia, f_c .

La expresión anterior es válida para Incidencia normal y zona masa controlada y se suele aproximar por:

$$R = PT = 20 \cdot \log(M \cdot f) - 42$$

Aunque normalmente se recomienda utilizar la válida para Incidencia aleatoria y zona masa controlada.

$$R = PT = 20 \cdot \log(M \cdot f) - 48$$

$$R = PT = 18 \log_{10} \frac{fM}{300}$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

MATERIAL	DENSIDAD [kg/m ³]
Hormigón	2.400
Ladrillo	1.600 - 2.400
Placa de Yeso	1.200 -1.300
ladrillo (roca de yeso)	950
Yeso	1.000
Aluminio	2.700
Hierro	7.800
Plomo	11.350
Vidrio	2.500 - 2.900
Policarbonato	160
Poliestireno expandido	33
Madera	400 - 800

En esta tabla se muestran valores de densidad volumétrica (kg/m³), de materiales usados habitualmente en la construcción y que pueden usarse tras pasarlos a densidad superficial (kg/m²) mediante el espesor del cerramiento en la formula de la ley de masa simple.

b) Aislamiento real de paredes simples

La ley de masas sólo se cumple en un intervalo de frecuencias que está determinado por **dos frecuencias características de una pared real** y en el entorno de los cuales no se cumple la ley de masas, con una reducción notable del aislamiento acústico.

La **frecuencia natural o de resonancia** del sistema (f_0) como un todo, frecuencia a la que vibra de forma natural un tabique cuando recibe la onda acústica incidente que depende de la masa de la pared y de las sujeciones perimetrales de la hoja. Está en las bajas frecuencias e interesa que sea lo más pequeña posible (fuera del rango de frecuencias de interés). f_0 disminuye si el espesor y las dimensiones de la pared aumenta.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Por ejemplo: Para obra húmeda $f_0 < 100$ Hz . Es la frecuencia del primer modo.

$$f_{m,n} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{B}{M}} \sqrt{\left(\frac{m}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{l_y}\right)^2} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{B}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{m}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{l_y}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$B = \frac{E \cdot I}{(1-\mu)^2} = \frac{E}{(1-\mu)^2} \frac{h^3}{12}$$

$$f_0 = f_{1,1} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{B}{M}} \sqrt{\left(\frac{1}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_y}\right)^2}$$

[dosdevibracio](#)

Donde:

- l_x, l_y : dimensiones tabique
- $M = \rho$: densidad superficial (Kg/m²)
- B : rigidez a la flexión
- E : Mod. Young
- I : momento inercia (espesor:m)
- μ : Mod. Poisson
- h : espesor placa

La **frecuencia crítica o de coincidencia** f_c , en la cual las ondas incidentes coinciden en frecuencia con las ondas longitudinales de flexión de la pared. Depende del material de la pared y su espesor (no de sus dimensiones). f_c disminuye si el espesor de la partición aumenta. Interesa que la frecuencia crítica sea lo más alta posible.

Por ejemplo para Paredes de albañilería:

Tabiquería ligera, f_c : Octava de 500 Hz

Ladrillo hueco o perforado 15 cm, f_c : Oct 250 Hz

Elementos pesado de hormigón, f_c : Oct 125 Hz

placas de yeso – espesor reducido – 2500-3000 Hz.

Esta frecuencia depende exclusivamente del material de la pared y de su espesor, según la expresión:

$$f_c = \frac{6,4 \cdot 10^4}{d} \sqrt{\frac{\rho \cdot (1-\gamma^2)}{E}}$$

$$f_c = \left(\frac{c^2}{1,8 \cdot d} \right) \sqrt{\frac{\rho}{E}}$$

Donde:

- d : espesor tabique (m)
- ρ : densidad (Kg/m³)
- γ : coef. Poisson
- c : vel. sonido (345m/s)
- E : Mod. Young

En la Fig. 4.3 se indican los valores de las frecuencias críticas de los materiales más habituales en la edificación.

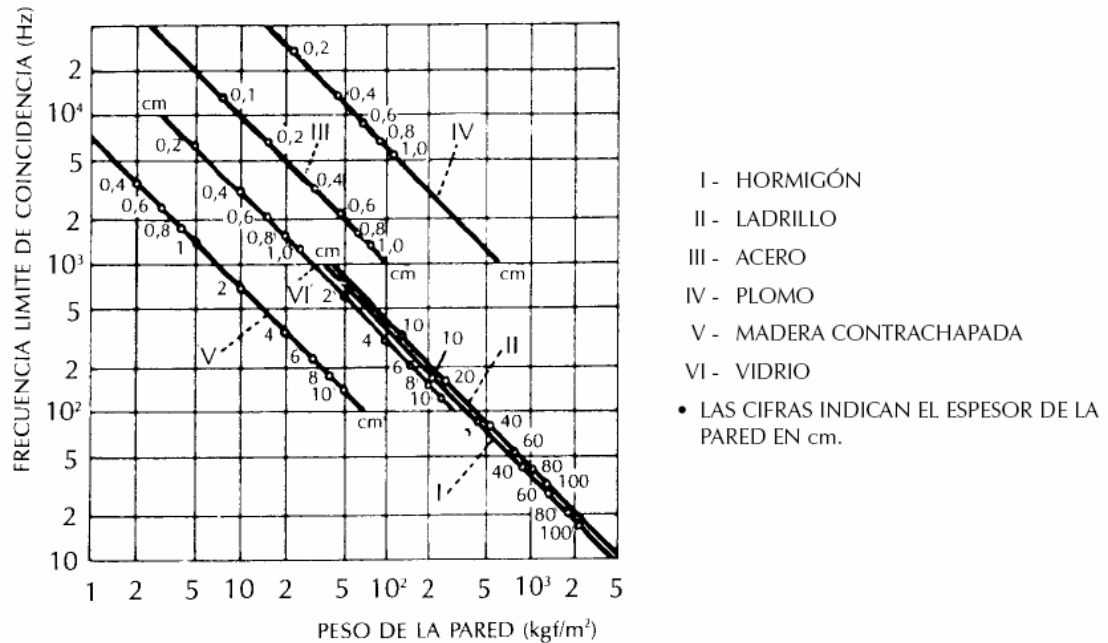


Figura 4.3. Valores de frecuencias críticas de materiales habituales.

Por lo tanto, se observa que existen tres zonas donde el aislamiento acústico está gobernado por diferentes factores, tal como se representan esquemáticamente en la Fig. 4.4.

- La zona de «**dominio de la elasticidad**» ($f < f_0$), que corresponde en general a muy bajas frecuencias y con un aislamiento descendente hasta « f_0 », donde es casi nulo.
- La zona de «**dominio de la masa**», que sí está gobernada por la ley de masas, caracterizada por $f_0 < f < f_c$ aproximadamente, donde:

$$R = 20 \log(m \cdot f) - 48(\text{dB})$$

- La zona de «**dominio del amortiguamiento interno**», que corresponde a $f > f_c$, en la cual el aislamiento baja de modo considerable hasta f_c y aumenta desde ese valor de un modo progresivo.

En esta zona, el factor que gobierna las variaciones del aislamiento es el amortiguamiento interno (η) del material, es decir, la capacidad del material para absorber energía de vibración a las ondas de flexión.

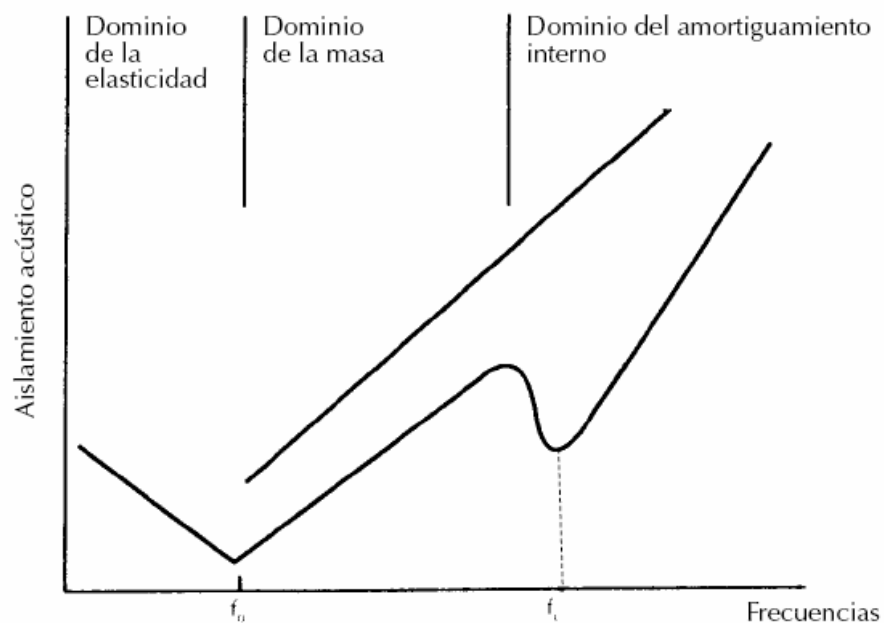


Figura 4.4. Aislamiento acústico de una pared simple.

Toda esta problemática está bien estudiada para las paredes simples de obra que se utilizan en la Edificación, como se representa en la Fig. 4.5.

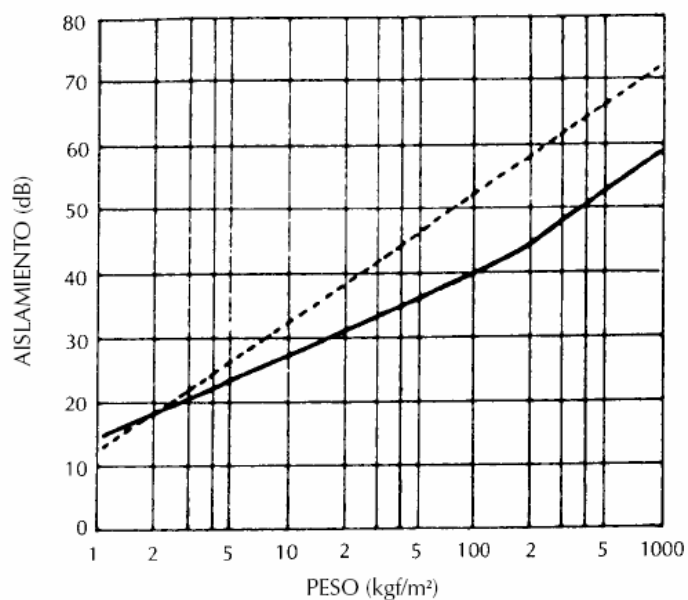


Figura 4.5. Comparativa ley masa teórica y ley masa experimental.

La curva de línea discontinua indica el valor del aislamiento en función de la masa para la pared ficticia considerada (Ley de masa teórica).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Sin embargo, en la práctica, y de acuerdo con los ensayos realizados en laboratorio con distintos tipos de materiales, se ha podido comprobar que los resultados obtenidos son inferiores (curva línea continua).

Se observa que existe una diferencia notable en el aislamiento de 10-15 dB para pérdidas reales, entre la ley de masa teórica y las medidas reales, debido a los factores de influencia explicados.

Importancia de la estanquidad

Los defectos en las juntas de albañilería, las rendijas en puertas y ventanas, las juntas de paneles prefabricados, etc., juegan un papel nefasto para el aislamiento acústico, dando lugar a las «fugas acústicas» o «puentes acústicos» (por asimilarlos a los puentes térmicos). Estas fugas dejan pasar fundamentalmente las frecuencias agudas. En la **práctica** los resultados reales son inferiores a los teóricos, ya que consideran **los paramentos homogéneos continuos e ilimitados**, sin tener en cuenta las transmisiones por flancos y los puentes acústicos. Es conveniente aplicar un cierto margen de seguridad en el cálculo de aislamientos ya que los resultados obtenidos en las obras, debido a “puentes acústicos” y a posibles defectos de ejecución, suelen ser inferiores del orden de **5 dB**.

Comparativa medidas laboratorio reales frente Ley de masas

	TEORICO	REAL	TEORICO	REAL	TEORICO	REAL
Frecuencias por Bandas de Octava Hz.	Aislamiento Acústico TABICON enlucido (11 cm) 225 Kgs/m ² DB.	Aislamiento Acústico TABICON enlucido (11 cm) 225 Kgs/m ² DB.	Aislamiento Acústico Forjado de HORMIGON 273 Kgs/m ² DB.	Aislamiento Acústico Forjado de HORMIGON 273 Kgs/m ² DB.	Aislamiento Acústico 1/2 Pié enlucido (21 cm) 450 Kgs/m ² DB.	Aislamiento Acústico 1/2 Pié enlucido (21 cm) 450 Kgs/m ² DB.
63	36	32	38	35	42	34
125	42	36	44	39	48	38
250	48	34	50	41	54	42
500	54	43	56	48	60	52
1.000	60	49	62	56	66	60
2.000	66	57	68	65	72	68
4.000	72	62	74	63	78	73
GLOBALES	43	37	45	41	49	40

2.4 Aislamiento de paredes múltiples

En el punto anterior se ha determinado el valor real del aislamiento acústico de una pared simple. El aislamiento aumenta con la frecuencia por lo que las paredes de obra simples necesitan de elevadas masas para obtener aislamientos importantes, como los que se requieren entre viviendas, no siendo esto siempre posible a nivel práctico y económico.

Si dicha pared de masa « m » la dividimos en dos hojas de masas $m_1 + m_2 = m$ y las separamos una distancia « d », el conjunto ofrece un aislamiento acústico superior al de la pared simple de masa equivalente. Se suele rellenar la cámara de aire con material absorbente para aumentar el aislamiento del sistema.



Este hecho representa un paso importante en el aligeramiento de las soluciones constructivas para un mismo valor de aislamiento acústico. Además, este aligeramiento puede ser muy notable con la utilización de materiales ligeros blandos a la flexión (es decir, de f_c elevada), como se verá más adelante.

El análisis del aislamiento (Fig. 4.6), en este caso, nos lleva a la aparición de frecuencias en el entorno de las cuales existe una fuerte reducción del aislamiento. En este caso se trata de la «frecuencia natural o de resonancia del sistema» y de las «frecuencias de cavidad», que dan lugar a zonas dominadas por diversos factores de influencia.

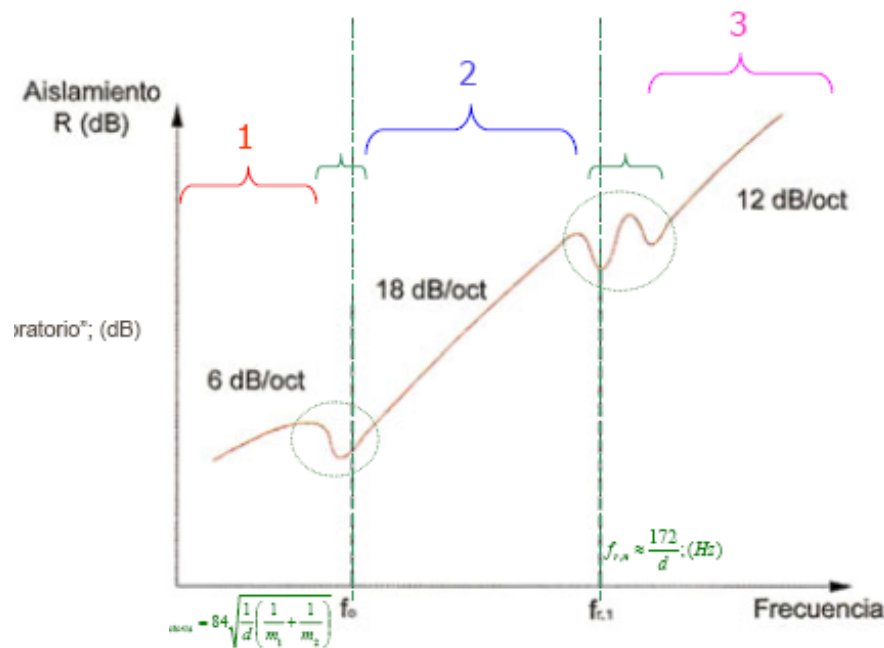


Figura 4.6. Respuesta en frecuencia teórica de un cerramiento doble.

- a) La frecuencia natural o de resonancia del sistema (f_0)** se refiere a un conjunto de masas m_1 y m_2 , unidas por un resorte de rigidez K .

Este sistema de masa-muelle-masa, con la capacidad de vibrar, posee una frecuencia de resonancia propia que viene definida por la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}} \text{ Hz}$$

Donde:

K - Rigidez del medio separador (N/m^3).

m_1 y m_2 - Masas de los elementos (kg/m^2).

El medio separador puede estar constituido por aire, un material determinado o un sistema mecánico. Si el medio lo constituye el aire, la frecuencia de resonancia viene dada por la expresión:

$$f_0 = 59,6 \sqrt{\frac{1}{d} \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}} \text{ Hz}$$

Donde:

d - Espesor de la capa de aire (cm).

m_1 y m_2 - Masas superficiales, en kg/m^2 .

Esta frecuencia será tanto **más baja cuanto mayores sean las masas y/o mayor la distancia entre ellas**. Para esta frecuencia, el aislamiento acústico es muy bajo, prácticamente nulo; por tanto, se debe conseguir que esta frecuencia sea lo más baja posible, ya que la sensibilidad del oído disminuye al disminuir la frecuencia.



La cámara de aire ha de tener unas dimensiones mínimas para funcionar como pared doble:

$$L(\text{cm}) > 105 \cdot \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)$$

Normalmente se busca que esta frecuencia esté por debajo del campo de medida (100 Hz).

Algunos estudios aconsejan para viviendas $f_0 < 90$ Hz, para evitar que aislamiento disminuya en baja frecuencia, donde además afecta f_0 y f_c de cada pared y para recintos de ocio $f_0 < 30$ a 40 Hz, evitar f_0 en las octavas de 63 y 125 Hz (efectos especiales, música disco,...).

b) La zona de «dominio de la elasticidad» ($f < f_0$), en que el comportamiento del sistema es idéntico al de una sola hoja de masa $m_t = m_1 + m_2$.

Precisamente para $f = f_0$, el aislamiento es casi nulo.

c) La zona de «dominio de las masas» ($f_0 < f < f_{\text{cavidad}}$).

Para frecuencias superiores a la frecuencia de resonancia es donde realmente se aprecia la ventaja de la doble pared, ya que para una masa equivalente a la pared simple la mejora del aislamiento teórica alcanza los 18 dB al duplicar la frecuencia, en vez de 6 dB.

El nivel de aislamiento obtenido en esta zona de frecuencias a nivel teórico puede calcularse mediante la expresión siguiente:

$$R = 20 \log \frac{m_1 \cdot m_2 \cdot d}{2 \rho^2 c^3} \omega^3 (\text{dB})$$

Donde:

m_1 y m_2 - Masas de elementos (kg/m^2).

d - Espesor de la capa de aire (m).

ω - Frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ (Hz).

ρ - Densidad de aire (kg/m^3).

c - Velocidad del sonido en el aire (m/seg).

Este valor queda reducido en torno a las zonas en que las masas m_1 y m_2 , tengan sus frecuencias críticas o de coincidencia, ya que en esas frecuencias cada una de las hojas será muy transmisora del sonido.

Se recomienda el uso de la siguiente ecuación corregida con medidas experimentales:

$$R(\text{dB}) = R(m_1) + R(m_2) + 10 \log d + 10 \log(k \cdot \alpha) + 10 \log \frac{(h+b)}{(h \cdot b)} + 3$$

Donde:

$R(m_1)$ y $R(m_2)$ - Son los aislamientos como pared simple.

d - Espesor de la capa de aire (m).

h - Alto real del paramento (m).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

b – Ancho real del paramento (m).

K - Factor de ponderación que toma los siguientes valores:

$K = 0,1$ para $L \leq 0,1$ m

$K = 0,2$ para $0,1 < L < 0,3$ m

$K = 0,5$ para $0,3 \text{ m} < L < 0,5\text{m}$

α – coeficiente de absorción del material dentro de la cámara de aire.

Recomendaciones generales para la mejora de aislamiento en cerramientos multiples.

La mejora del aislamiento se puede obtener con diversos procedimientos:

- Haciendo que ambas hojas, si son del mismo material, no sean iguales de espesor, para evitar el efecto de acoplamiento en una misma frecuencia crítica.
- Diseñando hojas de materiales diferentes, especialmente que uno de ellos sea blando a la flexión (cartón-yeso, chapa metálica...), para que al menos una de las hojas tenga una frecuencia crítica muy elevada (>3.000 Hz) donde el aislamiento ya es tan importante que no presenta influencias negativas apreciables.
 - o Este es el caso de los trasdosados sobre cerramientos o divisorios de obra, con placas de cartón-yeso.
 - o El límite ideal es la disposición de ambas hojas con materiales blandos a la flexión. Este es el caso de la tabiquería de montaje en seco, con placas de cartón yeso.
- Atenuación de transmisiones secundarias: Uso de materiales resilientes en el perímetro.
- Los procedimientos anteriores se deben complementar con un elemento absorbente interno en el interior de la cámara de aire (p.e.: lana de vidrio).
 - o El efecto de este elemento absorbente es conseguir un desacople de ambas hojas y una absorción de la energía acústica que se transmite de la hoja excitada por la vibración sonora, hacia la segunda.

d) La zona de «dominio de las resonancias de cavidad», gobernada exclusivamente por la distancia «d».

En esta zona el aislamiento baja fuertemente en el entorno de cada:

$$d = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{c}{2f}; \text{ La más baja es: } f_{cav} = \frac{c}{2d}$$

Representadas en las Fig. 4.7.

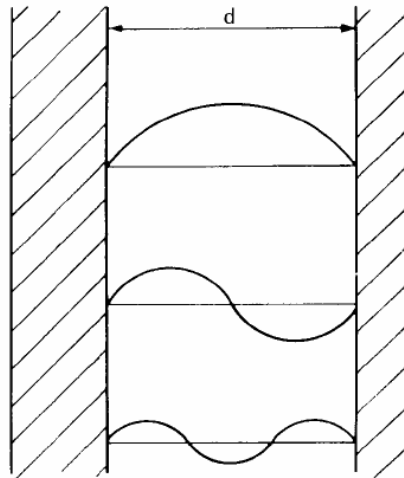


Figura 4.7. Ondas estacionarias en el interior de la cámara de aire.

Siendo:

c = Velocidad del sonido (m/s).

n = Número entero (1, 2, 3...).

d = Distancia en capas (m).

f = Frecuencia (Hz).

Para estas frecuencias, el sistema se comporta como una masa única $m_t = m_1 + m_2$, ya que ambas hojas se acoplan acústicamente, desapareciendo así el efecto aislante de la pared doble.

$$R(dB) = R(m_1) + R(m_2) - 10 \log \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{4} \right)$$

La presencia de elementos absorbentes en la cavidad (p.e.: lana de vidrio), amortiguará la fuerte caída del aislamiento, por absorción de buena parte de la energía de resonancia en la cavidad.

Importancia del acoplamiento rígido entre elementos.

Las capas de una pared múltiple no deben tener, a ser posible, ninguna unión rígida, ya que ésta provoca un cortocircuito acústico (puente fónico), que reduce el efecto de pared múltiple. En el caso límite, el aislamiento acústico sería el de una pared simple de peso equivalente al peso total.

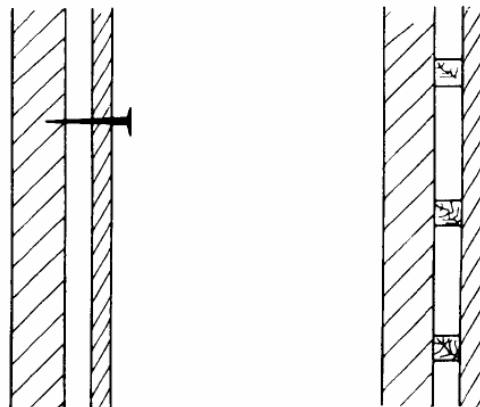


Figura 4.8. Uniones rígidas a evitar.



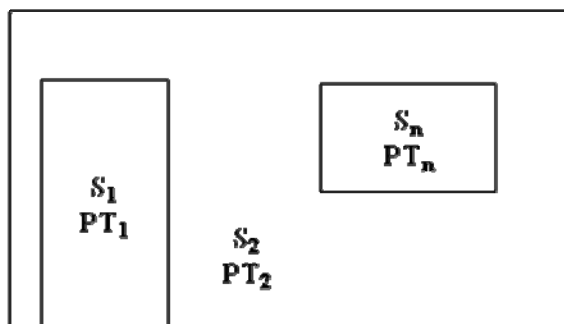
Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Si son inevitables tales puentes, como, por ejemplo, en las sujeciones laterales de las paredes, en los pasos inevitables de tuberías, etc., éstos deben ser relativamente blandos y ligeros para paredes pesadas, y pesados para paredes ligeras.

2.5 Pérdida de transmisión mixta o aislamiento mixto

Si tenemos ahora un tabique constituido por la yuxtaposición de varios materiales (por ejemplo una parte de hormigón, otra de ladrillo, y una ventana de vidrio), cada uno con una pérdida de transmisión (**PT_i** o **R_m**) y un área **S_i**, nos proponemos obtener la pérdida de transmisión equivalente de todo el tabique.



$$PT = R = 10 \log_{10} \frac{S}{\sum_{i=1}^n S_i 10^{-\frac{PT_i}{10}}}$$

El aislamiento mixto será como máximo 10 dB mayor que el aislamiento del elemento más débil (normalmente la ventana). Por lo tanto, mejorar el aislamiento de fachadas consiste en mejorar el aislamiento acústico de la ventana, empleando ventanas de mejor calidad.

Frecuencias Bandas de Octava Hz.	Aislamiento Acústico Cerramiento DB. R1	Aislamiento Acústico Puerta DB. R2	Aislamiento Acústico Paramento Compuesto DB.
125	38	12	21
250	42	15	24
500	52	20	29
1.000	60	22	31
2.000	68	26	35
4.000	73	30	39
GLOBAL	40	15	24

Sea un Cerramiento de 16 m² de Superficie, formado por un muro de Ladrillo de 14 m² con una Puerta de roble de 2 m² con un Aislamiento Acústico unitario, según la Tabla de la izquierda.

Como se observa la Puerta estropea mucho el Aislamiento del Cerramiento.

En ejemplo anterior observamos que una pequeña superficie sin aislamiento acústico puede destruir el efecto de un masivo y costoso tabique aislador en el resto. Para la edificación actual se traduce en que debemos tener un especial cuidado por las fachadas.

Se denominan pérdidas por fugas a los caminos parásitos por vía aérea que conectan los dos recintos a aislar. Algunos ejemplos son las grietas, juntas, ranuras y orificios que permanecen sin obturar. Es necesario prestar especial atención a estos defectos, ya que tienen una influencia notoria en la calidad del aislamiento realmente obtenido

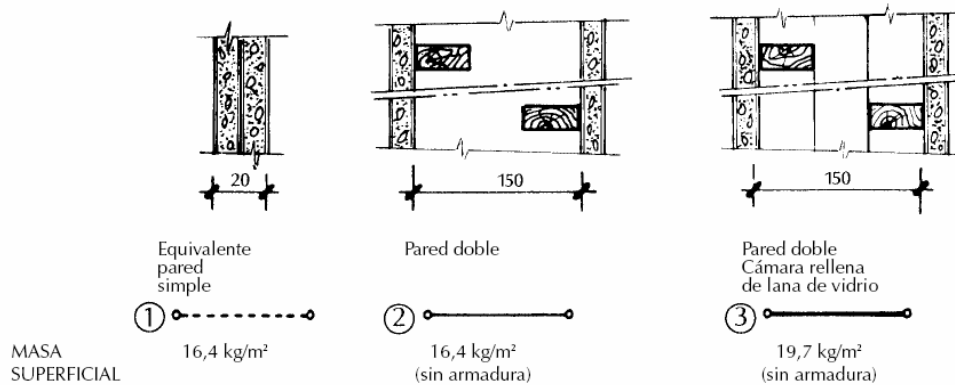


Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

2.6 Ejemplo de aislamiento a ruido aéreo

Se presenta a continuación un ejemplo comparativo que resume las características de los aislamientos de paredes simples y dobles, según mediciones reales de laboratorio, resumidas en la Fig. 4.9.



MATERIALES:

- Placa de cartón-yeso espesor 10 mm.
- Listón de 100 · 55 mm.
- Lana de vidrio espesor 150 mm.

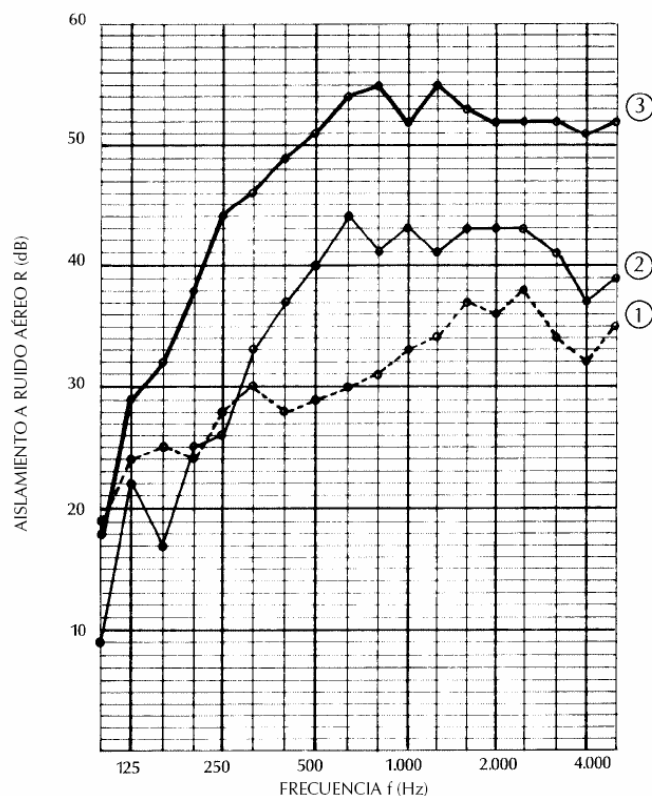


Figura 4.9. Aislamiento acústico a ruido aéreo de paramento ligero.



La curva 1 corresponde a las dos placas cartón-yeso juntas, pero no solidariamente unidas, por lo que la frecuencia crítica del material es de 4.000 Hz, que correspondería a una sola hoja. No obstante, se observa un cierto acoplamiento caracterizado por la bajada de aislamiento a 2.000 Hz, que correspondería a la frecuencia crítica de la pared unitaria de espesor 20 mm.

La curva 2 presenta un bajo aislamiento a la frecuencia natural del sistema ($f_0 \approx 100$ Hz), además de algunos acoplamientos debido a los rigidizadores, así como la influencia de las resonancias en cavidad y la importante reducción del aislamiento a la frecuencia crítica de las hojas iguales a 4.000 Hz.

No obstante, el aislamiento global es superior al de la hoja simple.

La curva 3 corresponde al mismo montaje ensayado en 2, pero con adición de lana de vidrio en la cavidad.

La curva 3 es sensiblemente parecida a la curva 2, pero con valores de aislamiento superiores.

Esto es debido al fuerte efecto de desacoplamiento de hojas y la absorción de la energía acústica en cámara. Ya en la frecuencia natural del sistema, la reducción de aislamiento es inferior y se amortiguan las caídas de aislamiento en torno a las frecuencias críticas y de cavidad.

3. AISLAMIENTO A RUIDO POR VIBRACIONES

3.1 Introducción

Los ruidos que se generan en medios sólidos (impactos, vibraciones) se transmiten por esas vías, con la velocidad y amortiguamiento que tengan los diferentes medios, hasta pasar al estado de transmisión aérea cuando se hayan alcanzado las condiciones favorables de acoplamiento al aire (p.e.: la vibración de una pared).

Los ruidos de impacto son originados en las percusiones o choques entre sólidos (caída objetos, pisadas...). En el choque se le comunica a este último una energía que le hace entrar en vibración, la cual se transmite a los elementos constructivos en contacto con él y provoca ondas sonoras en el aire del local receptor.

La vibración de un elemento constructivo sometido a impacto tiene las características de ser un ruido de muy corta duración y de propagarse con facilidad a los elementos constructivos contiguos, con muy poca atenuación, por lo que el ruido por impacto también será de corta duración, pudiendo aparecer en locales a gran distancia de su origen con una atenuación pequeña.

Los mecanismos de aislamiento a ruido de impacto pretenden disminuir la vibración del elemento constructivo, bien mediante el adecuado diseño del mismo, bien amortiguando el impacto para que no le transmita tanta energía. En este caso, es importante el adecuado diseño de las uniones con los elementos constructivos adyacentes, para evitar la propagación de la vibración a los mismos.

Los ruidos de vibración se propagan al entrar en contacto un elemento en vibración con cualquier otro elemento constructivo, con lo cual este último entra, también, en vibración transmitiéndola a cualquier otro en contacto con él y produciendo a su vez una radiación de ondas sonoras.

Estos ruidos se transmiten con mucha facilidad y hasta puntos muy lejanos del elemento que los origina, sin apenas atenuación.

La gran diferencia entre la transmisión de ruidos aéreos y la de ruidos de vibración o impacto, radica en el área que excita cada tipo de ruido. Los ruidos aéreos excitan, normalmente, toda la superficie expuesta



al campo acústico, mientras que los ruidos de vibración o impacto excitan una superficie mucho más limitada, con lo cual el grado de excitación suele ser mayor.

En los ruidos de impacto o vibración el aislamiento acústico consiste, en general, en evitar que los mismos pongan en vibración cualquier elemento en contacto con la fuente de ruido, aislando las posibles fuentes de ruido de impacto o vibración y evitando que la vibración se propague de un elemento a otro.

Cualquiera que sea el origen de la excitación del medio sólido, la única posibilidad de reducir la transmisión de la energía liberada es la separación del medio sólido excitado respecto al resto de la estructura del edificio. Esto se consigue introduciendo materiales elásticos en la vía de transmisión. El principio está basado en la capacidad amortiguante del material elástico de actuar como muelle, por lo que es necesario siempre que el material o sistema a introducir trabaje dentro de su campo elástico.

3.2 Índices de aislamiento a ruido de impactos y vibraciones

De acuerdo con lo establecido en la legislación, el valor del *Nivel de presión de ruido de impacto normalizado* L_n es, el Nivel de presión de ruido de impactos referido a una absorción sonora de 10 m^2 , de un elemento constructivo horizontal. Tal elemento es excitado por la *máquina de impactos normalizada*, en condiciones de ensayo en laboratorio (UNE EN ISO 140-6):

$$L_n = L_0 - 10 \log \frac{10}{A} \text{ dB}$$

donde:

L_n es el nivel sonoro normalizado

L_0 es el nivel medido por el equipo producido por una máquina de martillos normalizada, medido en el local receptor

A es el área absorbente del local receptor, en m^2 .

De igual forma podemos definir *Nivel de presión de ruido de impactos normalizado medido in situ*, L'_n como el Nivel de presión de ruido de impactos referido a una absorción sonora de 10 m^2 , de un elemento constructivo horizontal. (UNE EN ISO 140-7)

$$L'_n = L_0 - 10 \log \frac{10}{A} \text{ dB}$$

Y por último, el *Nivel de presión de ruido de impactos estandarizado*, L'_{nT} EXIGENCIA CTE como el Nivel de presión de ruido de impactos en el recinto receptor normalizado a un tiempo de reverberación de 0,5 s, cuando un elemento constructivo horizontal es excitado por una máquina de impactos normalizada (UNE EN ISO 140-7)

$$L'_{nT} = L_0 - 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ dB}$$

Existe una relación entre las magnitudes, L'_{nT} y L'_n mediante las características geométricas del recinto receptor:

$$L'_{nT} = L'_n - 10 \cdot \lg \frac{0,16 \cdot V}{A_0 T_0} = L'_n - 10 \cdot \lg (0,032 \cdot V) \text{ [dB]}$$

Al igual que los índices de ruido aéreo estas magnitudes dependen de la frecuencia y necesitan de un índice global que sea un único valor representando el valor en dB a 500 Hz de una curva de referencia que se desplaza para ajustarse a los valores de aislamiento obtenidos experimentalmente, según especifica la norma UNE EN ISO 717-2.

La diferencia de medidas sobre un elemento horizontal **antes y después** de aplicarle una solución de mejora para los ruidos de impacto representa la *reducción*.

$$\Delta L_N = L_{N1} - L_{N2} \text{ dB}$$

Un método teórico de cálculo, basado en la reducción de la energía transmitida, establece que el aislamiento acústico o mejora es:

$$L_N = 40 \log \frac{f_p}{f_n} \text{ dB}$$

Que es válida para toda $f_p > 3 \cdot f_n$. Donde f_p es la frecuencia de la perturbación o excitación del elemento que vibra y f_n es la frecuencia natural del elemento aislador (muelle, elástico, etc).

Los únicos valores admisibles son los de ensayo, pero este tipo de soluciones permite establecer resultados teóricos con suficiente aproximación a los reales de ensayo. En la fig. 4.10. puede verse el resultado de mejora a ruido de impacto de una losa flotante de hormigón sobre una lana de vidrio de 15 mm de espesor.

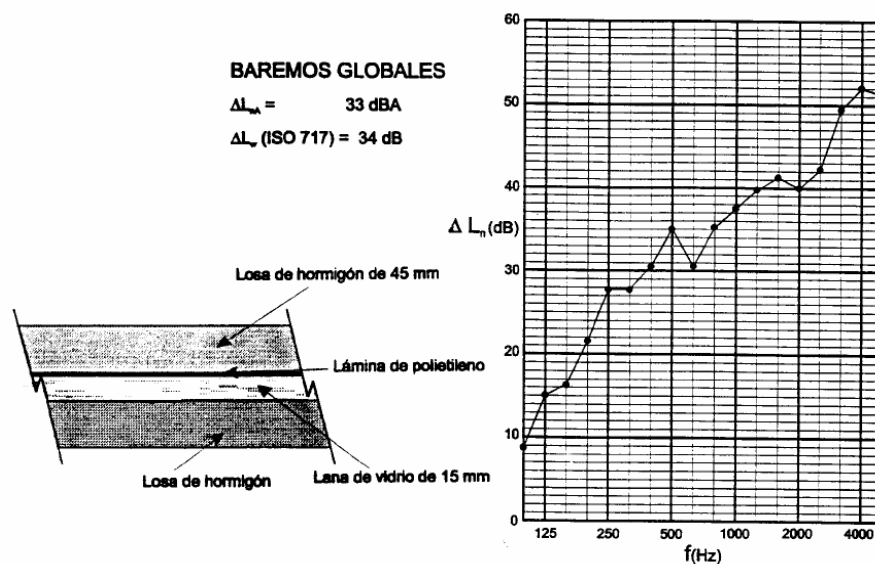


Figura 4.10. Mejora a ruido de impacto de una losa flotante de hormigón.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

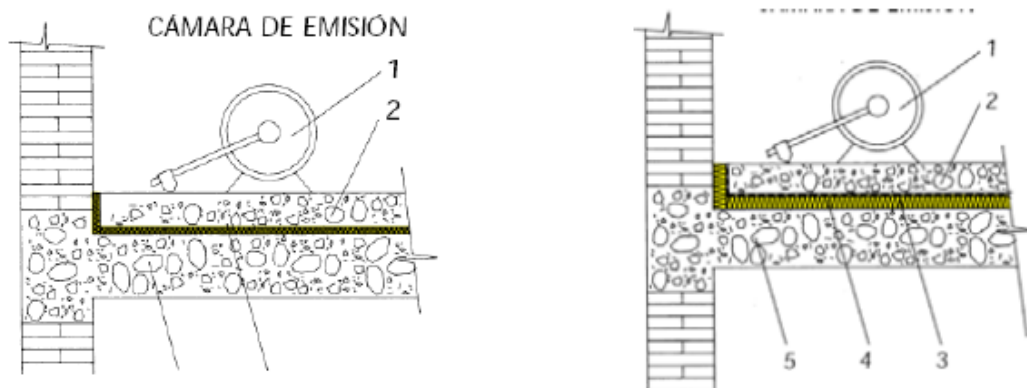
Acústica Arquitectónica

A continuación podemos ver una tabla resumen de los índices de aislamiento a ruido de impactos.

Relativas a elementos constructivos (Laboratorio)			Relativas a recintos (In Situ)		
Nombre	Por frecuencias	Global	Nombre	Por frecuencias	Global
Nivel de presión de ruido de impactos normalizado	L_n	$L_{n,w}$	Nivel de presión de ruido de impactos normalizado medido in situ	L'_n	$L'_{n,w}$
			Nivel de presión de ruido de impactos estandarizado	L'_{nT}	$L'_{nT,w}$

3.3 Amortiguamiento del ruido transmitido por vía sólida

La mejora del aislamiento a ruido de impactos o vibraciones suele resolverse en la construcción mediante la ejecución de un *suelo flotante sobre un elemento elástico*. Este elemento elástico hace que el sistema se comporte teóricamente como una masa unida a otra a través de un muelle. (leyes de Hooke)



Un sistema constituido por una masa, soportada por un elemento de características elásticas conocidas, tiene una frecuencia natural de vibración del sistema definida por (fig. 4.11):

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \text{ Hz}$$

Siendo:

f_n = frecuencia natural, en Hz

K = rigidez del elemento elástico en kg/sg²

M =masa, en kg

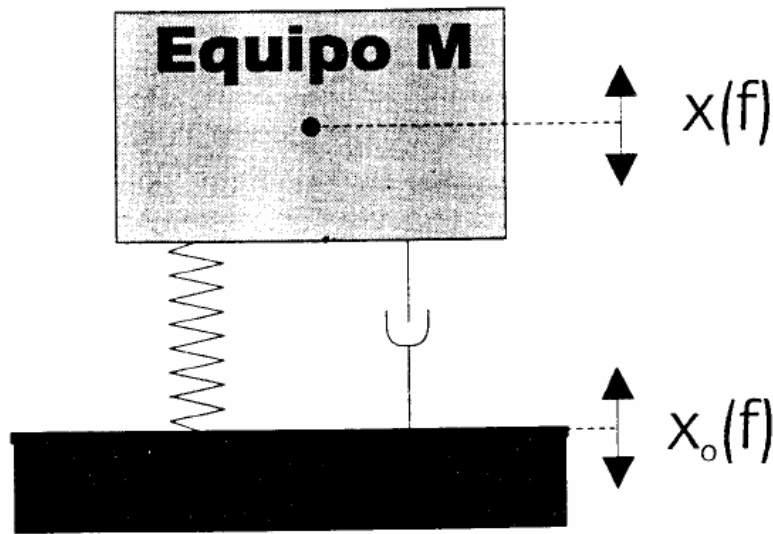


Figura 4.11. Aislamiento acústico a ruido aéreo de paramento ligero.

La rigidez del elemento elástico es la característica del elemento como muelle. Otra forma de establecer la frecuencia natural del sistema es la determinación de la deflexión estática de la capa elástica bajo la carga de la masa «M».

La expresión en este caso es:

$$\delta = \frac{m \cdot g}{k} = \frac{g}{\omega_n^2}$$

$$f_n = \frac{15,7}{\sqrt{\delta}} \text{ Hz}$$

Siendo « δ », el valor de la deflexión estática en mm y g es la gravedad.

Si el sistema constituido por la masa « m » y el muelle de rigidez dinámica « k », se le somete a una excitación de frecuencia perturbadora « f_p », la transmisibilidad de la energía de excitación es:

$$TF = \frac{1}{\left(\frac{f_p}{f_n}\right)^2 - 1}$$

Siendo « TF » la transmisibilidad de la energía de perturbación.

La representación gráfica de la función anterior (fig. 4.12) permite establecer:

- Para $f_p/f_n < 1/2$, la transmisibilidad es igual que si no existiera unión elástica.
- Para $1/2 < f_p/f_n < 2$, la transmisibilidad aumenta fuertemente por el efecto de resonancia del sistema para $f=f_n$.
- Para valores de $f_p/f_n > 2$, la transmisibilidad comienza a reducirse de modo apreciable, de modo que para $f_p/f_n=3$, el valor transmitido es sólo 16,66% de la energía de excitación.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Nota: Las expresiones de la transmisibilidad se han simplificado considerando que no existe ningún tipo de amortiguamiento interno en el sistema masa-muelle, lo que no es cierto en la realidad, ya que siempre existirá amortiguamiento. No obstante, la utilización de la expresión recomendada permite unos resultados aceptables en la práctica totalidad de los casos que se presentan.

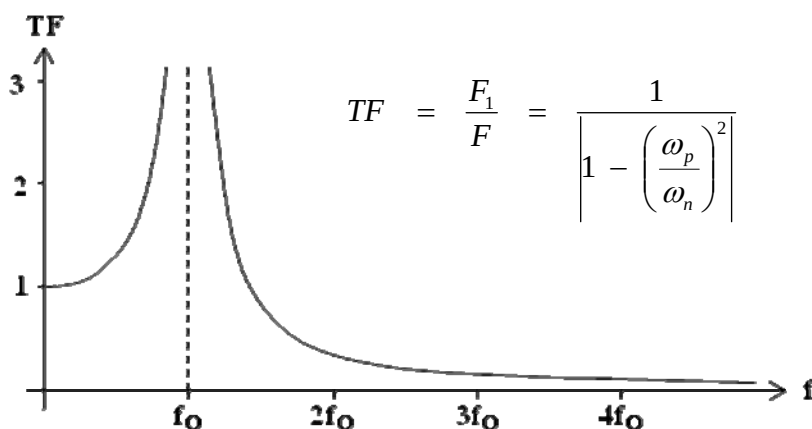


Figura 4.12. Transmisibilidad de la energía de la vibración.

El valor práctico generalmente admitido es que deben utilizarse elementos elásticos con una f_n tal, que sea como mínimo $f_n = f_p/3$, siendo f_p el valor de la frecuencia más baja capaz de excitar el sistema. Por ejemplo, si se quiere proteger la estructura de un edificio de las vibraciones que genera un compresor que trabaja a 1.450 rpm, deberán instalarse elementos amortiguadores que presenten una $f_n \leq 1.450/60 \cdot 3$ Hz, con la masa total repartida en el número de elementos amortiguadores diferentes.

Por medio de la siguiente tabla se puede calcular la frecuencia de resonancia requerida para tener un determinado TF, y luego puede utilizarse la segunda para obtener la deflexión estática δ .

TF [%]	1	2	4	8	10	20	40	80	100
f_n / f_p	0.10	0.14	0.20	0.27	0.33	0.41	0.53	0.67	0.71

Tabla 4.1. Frecuencia de resonancia f_n (relativa a la frecuencia de operación f_p) para obtener determinado valor de TF.

f_n (Hz)	1	2	4	6	8	10	12	15	20
δ (mm)	250	62	16	6,9	3,8	2,5	1,7	1,1	0,6

Tabla 4.2. Deflexión estática δ requerida para obtener diversos valores de frecuencia de resonancia f_n

A efectos prácticos, también puede utilizarse el gráfico de la fig. 4.13, para la determinación de la f_n necesaria para grado de aislamiento, dado en tanto por ciento de excitación no transmitida.

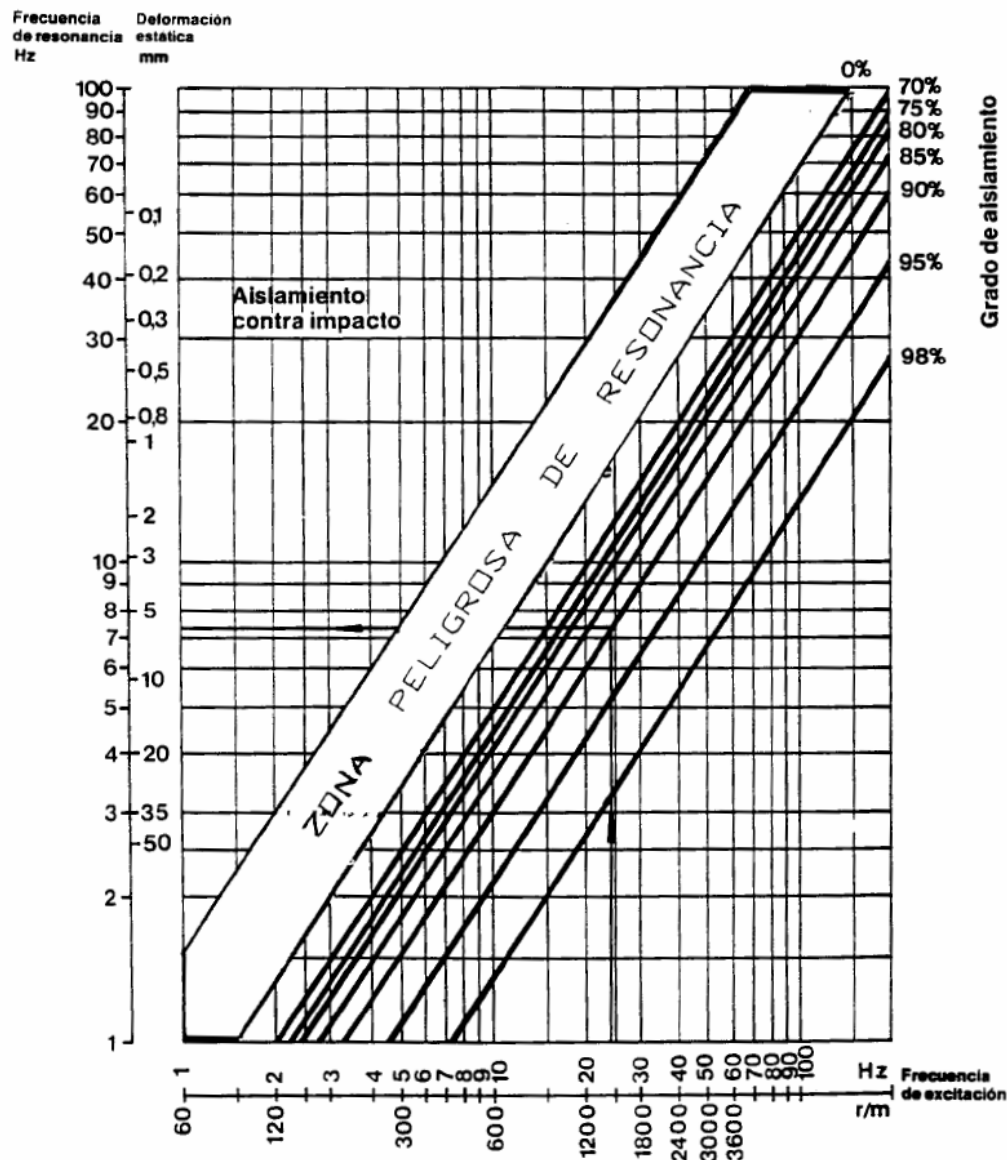


Figura 4.13. Gráfico de utilización práctica para cálculo de amortiguaciones.

Es muy importante establecer que los elementos de amortiguación se construyen por los fabricantes para un intervalo de cargas determinado y para el que se garantiza la f_n de catálogo. Fuera de ese intervalo de cargas, los elementos trabajan mal o no trabajan. Si la carga es inferior a la prevista, el material trabaja con una f_n superior a la prevista, lo que aumentará la transmisibilidad y por tanto la energía de la vibración; si la carga es superior a la prevista, el material se aplastará saliendo del campo elástico de trabajo, con el resultado equivalente a que se rigidiza y parece como si no se hubiera puesto ningún elemento de amortiguación.

En resumen: la elección de los elementos de amortiguación dependerán de la f_n que se haya determinado y del modelo adecuado para esa f_n , con cada una de las cargas (iguales o no) en que se reparta el peso total del equipo.

Un aspecto relativo a la elección de los elementos de amortiguación es la necesidad o no de disponer de bancadas de inercia en la instalación de equipos.

En algunos casos es necesario montar la máquina que se quiere aislar sobre una **base inercial**, es decir un soporte rígido masivo, que a su vez se encuentra aislado de la estructura del edificio en la forma ya analizada,

- Cuando la frecuencia natural requerida para cumplir con determinado requisito de transmisión de fuerza **TF** es demasiado baja.
- Cuando el centro de masa está muy por encima de los aisladores (resortes).
- Cuando la máquina requiere una base rígida.

El agregado de una masa considerable solidaria a la máquina permite aumentar k cambiando la frecuencia natural del sistema,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m + M}}$$

Una bancada de inercia no tiene ningún efecto sobre la eficacia en la función antivibratoria, pero sí puede afectar a la magnitud del movimiento propio del equipo.

Lo anterior tiene especial importancia cuando los equipos presentan fuerzas desequilibradoras notables para su tamaño o tipo de movimiento. Cuando más se manifiestan estos problemas es en los periodos de arranques y paradas de los equipos, ya que al trabajar en frecuencias próximas y por debajo de f_n , el sistema está controlado por la rigidez de las uniones por encima de f_n , el sistema resulta amortiguado.

Por todo esto, es fundamental la determinación previa de disponer o no de bancadas de inercia, ya que afectan a la elección del modelo, cuando no del tipo de los elementos de amortiguación.

3.4 Materiales y tipos de elementos de amortiguación

Los tipos generales son:

- a) **Antivibradores metálicos:** Están constituidos por muelles de acero al carbono, con alta resistencia a la tracción. Tienen una gran capacidad de deformación elástica bajo carga, por lo que se recomiendan para aislar **frecuencias bajas** (menos de 1.000 rpm, es decir, 16 Hz). En el mercado se encuentran modelos con f_n tan baja como 2 Hz (fig. 4.14.).

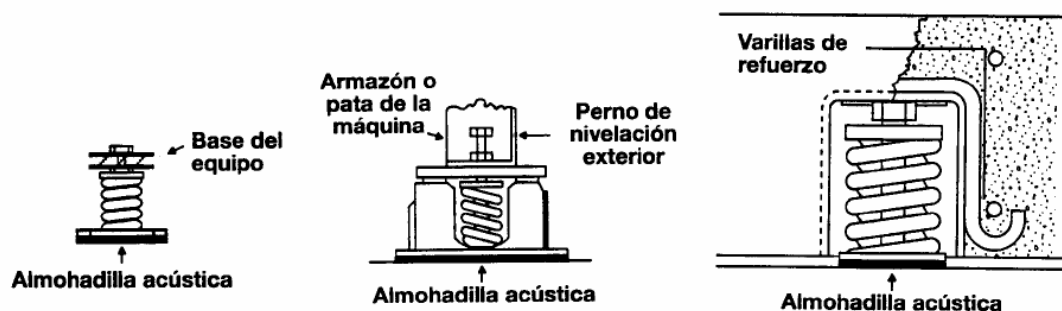


Figura 4.14. Antivibradores metálicos.

- b) **Antivibradores de caucho:** Se trata de material natural o mezclado sometido a proceso de vulcanización, con las características técnicas necesarias. Tienen menor capacidad de deformación que los metálicos, por lo que sólo pueden recomendarse para **frecuencias superiores a 20 Hz**. Sin embargo, tienen una buena amortiguación interna absorbiendo muy bien los impactos. Se encuentra en el mercado con f_n desde 7 Hz (fig. 4.15.).

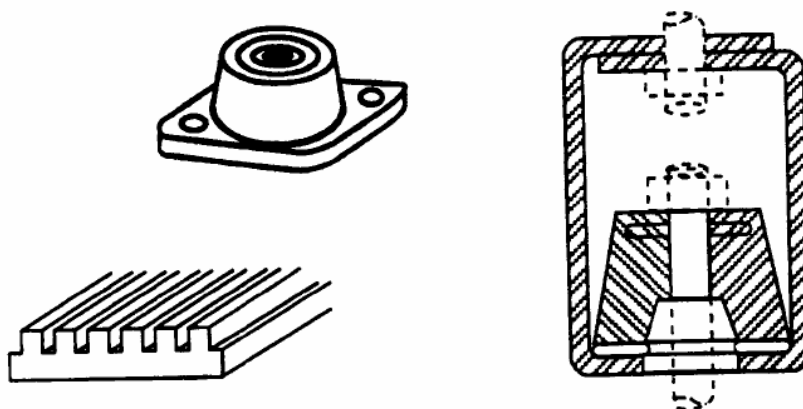


Figura 4.15. Antivibradores de caucho.

- c) **Lanas minerales:** Las lanas de vidrio y roca, con densidades adecuadas, actúan como elementos amortiguadores con valores aceptables de trabajo para **frecuencias superiores a 30 Hz**. Esto es posible por el bajo módulo de rigidez dinámica de las lanas minerales, que es algo superior al del aire. Así, bajo cargas uniformemente repartidas (losas flotantes), se obtienen sistemas con f_n de 10 Hz. El material trabaja perfectamente dentro de su campo elástico ya que las deformaciones bajo carga son de 2-3 mm.



4. LAS MEJORAS DE AISLAMIENTO EN EL DB-HR

4.1 Introducción

El DB-HR define **revestimiento** como: “Capa colocada sobre un elemento constructivo base o soporte. Se consideran revestimientos los trasdosados en elementos constructivos verticales, los suelos flotantes, las moquetas, y los techos suspendidos, en elementos constructivos horizontales”.

Por lo tanto, introducen una Mejora de Aislamiento:

- A ruido aéreo
 - o Trasdosados y techo suspendidos (suelo flotante)
- A ruido de impactos
 - o Suelo flotante y moquetas

Los índices de mejora utilizados en el DB-HR nos permiten obtener magnitudes de aislamiento de sistemas o elementos básicos cuando, a ellos, **se les añade un elemento adicional o revestimiento**. Los dos tipos de mejoras según el ruido serán:

- Mejora del Índice de reducción acústica, ΔR
 - o Aumento del índice de reducción acústica de un elemento constructivo por adición de un tratamiento o revestimiento al elemento constructivo base.
 - o Diferencia entre el índice de reducción acústica de un elemento constructivo de referencia con el revestimiento de mejora y el propio del elemento constructivo base
- Reducción del nivel de presión de ruido de impactos de un suelo flotante o un techo suspendido, ΔL
 - o Diferencia entre el nivel de presión de ruido de impactos normalizado de un forjado normalizado de referencia con el suelo flotante o el techo suspendido y el propio del forjado de referencia

$$R = R_0 + \Delta R$$

El ΔR_A depende del tipo de elementos base. Si la m o R_A del elemento base aumentan el ΔR_A disminuyen. Puede que los resultados de ΔR_A sobre un elemento no sean aplicables a otros elementos base, por lo que se debe emplear la mejora con el elemento base en el que se ha obtenido.



Por ejemplo, los Trasdosados son revestimientos colocados sobre un elemento constructivo vertical, que se caracteriza por la mejora del índice global de reducción acústica ΔR_A (dBA). Habitualmente, trasdosados ligeros como las placa de yeso laminado (PYL) + lana mineral o trasdosados cerámicos. La mejora depende del elemento sobre el que se aplica, y es mayor para elementos más débiles y se realizan varios tipos de montaje del trasdosado tanto trasdosado directo como trasdosado semidirecto y trasdosado autoportante.

Trasdosado Directo

Se instala aplicando pelladas de pasta de agarre, superponiéndolo sobre tabique base y presionando

$$\Delta R_A \approx 10 \text{ dB}$$

Trasdosado Semidirecto

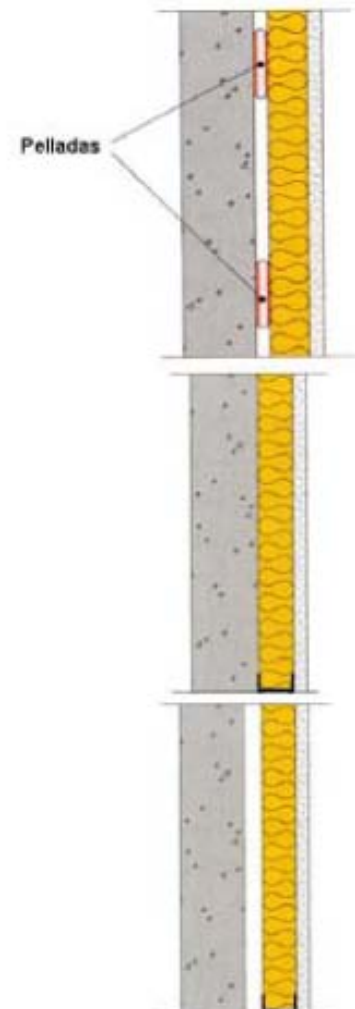
Se aplica también sobre el elemento constructivo base pero mediante unos perfiles de sujeción en contacto con éste

$$\Delta R_A \approx 10 \text{ dB}$$

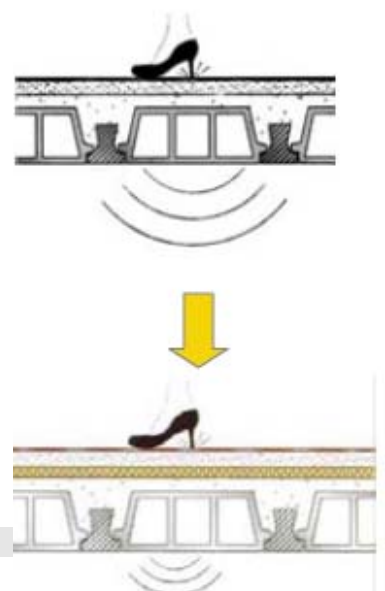
Trasdosado Autoportante

El trasdosado se atornilla a una estructura metálica que se instala separada del elemento del elemento constructivo base (cámara de aire)

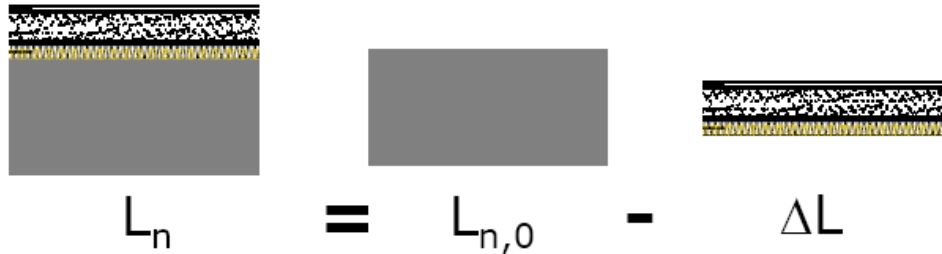
$$\Delta R_A \approx 17 \text{ dB}$$



Para disminuir L_n podemos aumentar la masa del forjado aunque termina siendo una mala opción. El uso de suelo flotante reduce el nivel de ruido de impacto y mejora el aislamiento a ruido aéreo (+ en lana mineral). Se deben aplicar elementos que amortigüen el impacto antes de que la energía se transmita a la estructura. Los materiales flexibles que se suelen utilizar en el suelo flotante son la lana mineral, el polietileno y el poliestireno expandido elastificado. Las moquetas también son un material de absorción de la energía de impacto. Es importante cuidar su buena ejecución y se caracterizan por el ΔL_w (dB) y el ΔR_A (dBA).



Reducción del ruido de impactos, ΔL . El efecto de la capa elástica de un suelo es producir un cambio de forma en el pulso de la fuerza de impacto y reducir la potencia acústica comunicada al forjado.

$$L_n = L_{n,0} - \Delta L$$


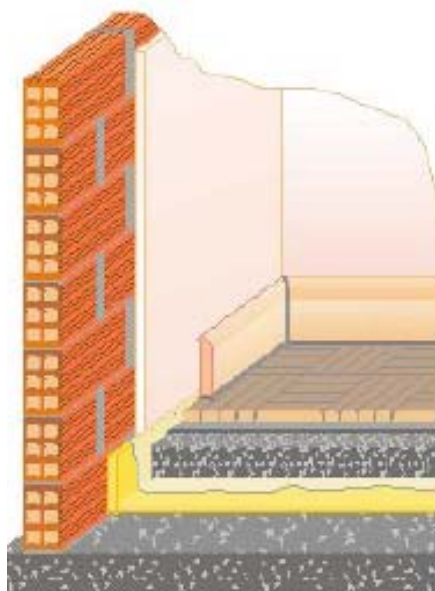


Figura 4.16. Suelo flotante.

La estructura típica de los Suelos Flotantes se muestra en la figura 4.16. Se coloca sobre el forjado base la lámina de material elástico y homogéneo, posteriormente la losa flotante que normalmente está formada por una capa de mortero de unos 5 cm de espesor, soporte del pavimento. También se puede hacer seco con PYL's. El acabado o solado suele ser terrazo, parquet, tarima...

Como consideraciones de montaje que se deben tener os recomiendo:

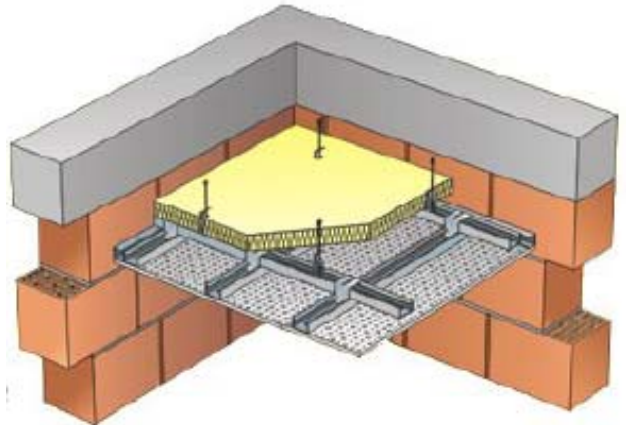
- Proteger la lana mineral o polietileno con una lámina plástica impermeable.
- Evitar el contacto directo y rígido entre SF y demás elementos constructivos
Sellado perimetral elástico.
- NO compartir suelo flotante entre dos recintos pues las perturbaciones se transmitirán de uno a otro a través del propio suelo.



Los techos suspendidos (Falso techo) son otro sistema de revestimiento de forjado que mejoran el aislamiento a ruido aéreo ΔR_A y aumentan la absorción del recinto mediante el α , coeficiente de absorción acústica. También contribuyen a reducir el ruido de impactos (pero sólo actúan en el recinto en el que se montan). Su estructura suele ser

- Placa de yeso laminado / placa de escayola
- Cámara rellena de lana mineral

Consiguiendo mejoras aproximadas de $\Delta R_A \approx 1$ a 15 dBA .



5. DISEÑO DE SOLUCIONES DE AISLAMIENTO SEGUN DB-HR: OPCIÓN SIMPLIFICADA

El DB-HR define solución de aislamiento como el estudio del conjunto de todos los elementos constructivos que conforman un recinto (elementos de separación verticales y horizontales, tabiquería, medianerías, fachadas y cubiertas) y que influyen en la transmisión del ruido y vibraciones entre recintos adyacentes o entre el exterior y un recinto.

El documento define dos opciones para realizar este diseño:

- Opción simplificada
 - o Método comparativo basándose en tablas de valores del aislamiento
- Opción general
 - o Un procedimiento de cálculo basado en el modelo simplificado para la transmisión estructural de la UNE EN 12354 partes 1, 2 y 3

En las transparencias del documento técnico adicional que podéis encontrar en material, se explica visualmente con tablas y figuras como se plantea el diseño de soluciones constructivas de aislamiento mediante la opción simplificada. Además se incorpora un ejemplo de aplicación para una edificación tipo.

Este documento sirve de ayuda para comprender el apartado del DB-HR donde se refiere al aislamiento acústico método simplificado. Por lo tanto, se recomienda la lectura de este apartado utilizando el documento de presentación.



6. ENUNCIADO PROBLEMAS

Como práctica de los conceptos estudiados en este Tema, se proponen a continuación cinco problemas. Estos problemas corresponden con la información contenida en la documentación tanto técnica como adicional. Le invitamos a que los resuelva y compare los resultados obtenidos con las soluciones que se facilitan más adelante.

6.1 Problema 1

Obtener la pérdida de transmisión de una plancha de **1 mm** de plomo para una frecuencia de **1000 Hz**.

6.2 Problema 2

Una pared de **5 m × 3 m × 10 cm** de hormigón tiene una ventana abierta de **30 cm × 20 cm**. Obtener la pérdida de transmisión a **1000 Hz**.

6.3 Problema 3

Una máquina rotativa se mueve a **2000 rpm** (revoluciones por minuto) y tiene una masa excéntrica de **20 kg** a **2 mm** del eje. **a)** Determinar la constante elástica de un aislador de vibraciones para la máquina, suponiendo que su masa total es de **120 kg**, si se desea un coeficiente de transmisión de fuerza **TF = 0,1**. **b)** especificar el valor de la deflexión estática δ requerido y obtener la amplitud de las vibraciones cuando la máquina está en funcionamiento.

6.4 Problema 4

Un compresor con una masa de **150 kg** produce vibraciones de **40 Hz** que se transmiten a la estructura con una fuerza máxima en dirección vertical de **2200 N**. Se requiere reducir la fuerza transmitida hasta un valor menor de **20 N**. Si la máxima amplitud de vibración admisible es, por especificación, **0,1 mm**, dimensionar la constante elástica y la masa de una base inercial apropiadas.

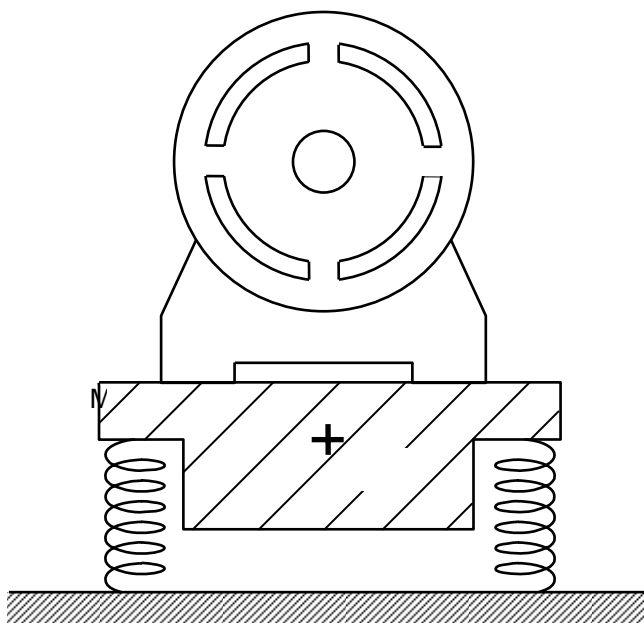


Figura. La base inercial ha sido conformada de tal modo que el centro de masa quede próximo a la línea de apoyo sobre los aisladores.



7. SOLUCIONES PROBLEMAS

7.1 Problema 1

Este problema se puede solucionar usando las diferentes formulas de la ley de masas simple que hemos presentado. Como ejemplo En este caso, $M = 11.300 \times 0,001 \text{ kg/m}^2 = 11,3 \text{ kg/m}^2$. Entonces

$$PT = 18 \log_{10} \frac{1000 \cdot 11,35}{300} = 28 \text{ dB} .$$

Por su alta densidad, el plomo resulta un buen material para aislamiento acústico en aquellos casos en que se requiere una considerable pérdida de transmisión en poco espacio. Se aplica, por ejemplo para aislar pequeños recintos insonorizados, como las cabinas para realizar audiometrías.

7.2 Problema 2

Las áreas del hormigón y de la ventana son, respectivamente,

$$S_H = (5 \cdot 3 - 0,3 \cdot 0,2) \text{ m}^2 = 14 \text{ m}^2 ,$$

$$S_V = 0,3 \cdot 0,2 \text{ m}^2 = 0,06 \text{ m}^2 ,$$

y las densidades

$$M_H = 2.400 \cdot 0,1 \text{ kg/m}^2 = 240 \text{ kg/m}^2 ,$$

$$M_V = 0 .$$

Con estos valores, resulta

$$PT_H = 52 \text{ dB} ,$$

$$PT_V = 0 \text{ dB} .$$

Con respecto a la PT_V , conviene aclarar que por ser la densidad $M_V = 0$, no puede aplicarse la ecuación directamente, pues se obtendría un valor de $-\infty$. En este caso, prevalece la ecuación. El valor obtenido de **0 dB** significa que no existe aislamiento, lo cual es lógico, ya que toda la potencia que llega a una ventana abierta es radiada hacia el exterior.¹ Finalmente,

$$\begin{aligned} PT &= 10 \log_{10} \frac{15}{14,94 \cdot 10^{-\frac{52}{10}} + 0,06 \cdot 10^{-0}} = \\ &= 10 \log_{10} \frac{15}{\underbrace{0,000094}_{\text{hormigón}} + \underbrace{0,06}_{\text{ventiluz}}} = 24 \text{ dB} \end{aligned}$$

¹ Salvo posibles efectos de difracción si la ventana es demasiado pequeña.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Vemos que el gran aislamiento del hormigón se pierde debido a la existencia de la abertura. Más aún, podríamos haber colocado una pared de **10 cm** de plomo macizo y no habríamos obtenido ninguna mejora. Veremos más adelante que esta situación es bastante frecuente, y podría sintetizarse en lo siguiente: una pequeña superficie sin aislamiento acústico puede destruir el efecto de un masivo y costoso tabique aislador en el resto. Es el caso de los intersticios en los cierres de las aberturas.

7.3 Problema 3

a) Para $\omega > \omega_0$, se tiene

$$TF = \frac{1}{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 1},$$

de donde

$$\omega_0 = \omega \sqrt{\frac{TF}{1 + TF}} = 2\pi \frac{2000}{60} 0,3 = 63 \frac{1}{\text{seg}},$$

que corresponde a unos **10 Hz**.

Dado que

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

podemos despejar **k**:

$$k = m \omega_0^2 = 4,78 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 49 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}}$$

El aislamiento deseado condiciona la frecuencia de resonancia y ésta a su vez condiciona la constante elástica requerida.

b) Tenemos $f = \frac{2000}{60} \text{ Hz} = 33 \text{ Hz}$. De la tabla 4.1 o de la fórmula, para **TF = 0,1 (10%)** resulta

$$f_0 = 0,3 f = 10 \text{ Hz}.$$

De allí mediante la fórmula de la deflexión estática obtenemos

$$\delta = \frac{980}{(2\pi \times 10)^2} = 0,25 \text{ cm},$$

que también puede obtenerse de la tabla 4.2. Para obtener la amplitud de la vibración, tengamos en cuenta que

$$X = \frac{F_1}{k} = TF \frac{F}{k} = TF \frac{F}{m g / \delta}.$$

Entonces



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

$$X = 0,1 \frac{1754 \text{ N} \times 0,0025 \text{ m}}{120 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/seg}^2} = 0,37 \text{ mm} .$$

La atenuación en un factor de **10** se consigue porque a la máquina se le permite vibrar con gran amplitud (gracias al apoyo elástico), absorbiendo gran parte de la fuerza original para lograr la aceleración requerida por dicha amplitud.

7.4 Problema 4

Se requiere $TF \leq 20/2200 \cong 0,0091$. De la ecuación resulta

$$f_o = f \sqrt{\frac{0,0091}{1 + 0,0091}} = 3,8 \text{ Hz} .$$

Dado que la máxima fuerza resultante es proporcional a través de la constante elástica a la amplitud de las vibraciones, resulta

$$k = \frac{F_1}{X} = \frac{20}{0,0001} = 200000 \text{ N/m} .$$

y por consiguiente

$$M + m = \frac{k}{(2\pi f_o)^2} = 351 \text{ kg} .$$

De aquí resulta que la base inercial tendrá que tener una masa **M = 201 kg**.

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA (T5)

PROYECTOS DE AISLAMIENTO ACÚSTICO. PARTE 2ª.

Acústica Arquitectónica

Edición 2009-2010

Profesor: Juan M. Navarro

UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN ANTONIO DE MURCIA



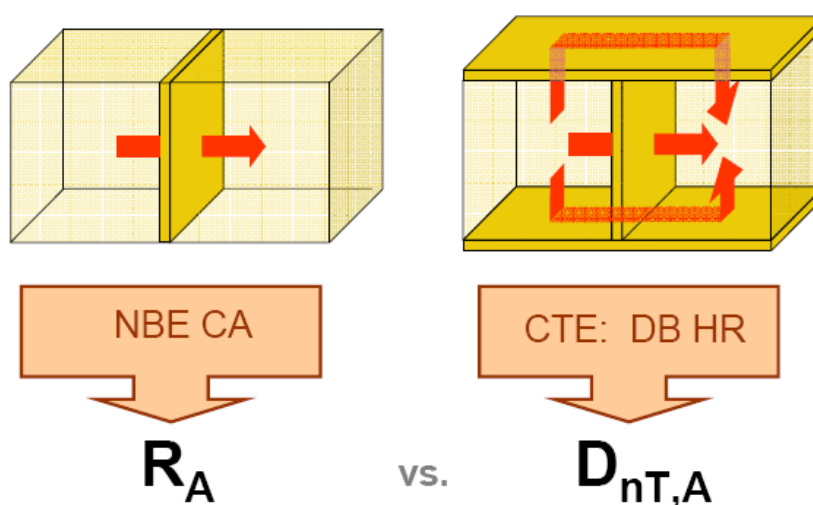
Contenido

1. DISEÑO DE SOLUCIONES DE AISLAMIENTO SEGÚN DB-HR: OPCIÓN GENERAL	3
1.1 Planteamiento general	3
1.2 Índices de aislamiento contemplados	6
1.3 Procedimiento de aplicación de la opción general	6
2. CÁLCULO DEL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO INTERIOR.....	8
2.1 Pasos a seguir	8
2.2 Índice a calcular	8
2.3 Cálculo de aislamiento del camino directo.....	10
2.4 Transmisiones laterales o por flancos	11
2.5 Suma de todos los caminos y corrección por geometría.....	13
3. CÁLCULO DEL AISLAMIENTO A RUIDO DE IMPACTOS.....	14
3.1 Pasos a seguir	14
3.2 Índice a calcular	14
3.3 Cálculo del nivel de impactos del camino directo	15
3.4 Cálculo de las transmisiones indirectas.....	16
3.5 Suma de todos los caminos y corrección por geometría.....	16
4. CÁLCULO AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO EXTERIOR.....	17
4.1 Pasos a seguir	17
4.2 Índice a calcular	17
4.3 Influencia aireadores.....	18
4.4 Influencia de la forma de fachada.....	19
5. RUIDO Y VIBRACIONES DE LAS INSTALACIONES.....	19
5.1 Introducción.....	19
5.2 Datos previos	20
5.3 Equipos generadores de ruido estacionario	20
5.4 Conducciones y equipamiento.....	21
6. HERRAMIENTA DE CÁLCULO DEL DB-HR	22
6.1 Introducción.....	22
7. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA OPCIÓN GENERAL	24

1. DISEÑO DE SOLUCIONES DE AISLAMIENTO SEGÚN DB-HR: OPCIÓN GENERAL

1.1 Planteamiento general

Como hemos remarcado en temas anteriores, la diferencia principal entre la NBE-CA88 y el CTE DB-HR radica en que la primera trabaja con valores de parámetros de laboratorios centrados en productos y materiales, mientras que el segundo incorpora valores certificables “in-situ” centrándose en sistemas y soluciones completas de un edificio.



Esto crea la necesidad de un modelo de predicción completo apareciendo dos opciones para el diseño de soluciones de aislamiento según el DB-HR. Una opción simplificada basada en varias tipificaciones de soluciones de aislamiento estudiada en el tema anterior y una opción general que utiliza un método de cálculo estandarizado.

La opción general está basada en el cálculo para la transmisión estructural de las tres primeras partes de la Norma **UNE EN 12354**. El documento básico también acepta el modelo detallado de dicha Norma. Para la comprensión de esta norma es muy importante conocer los diferentes caminos de transmisión acústica representados en la Figura 5.1:

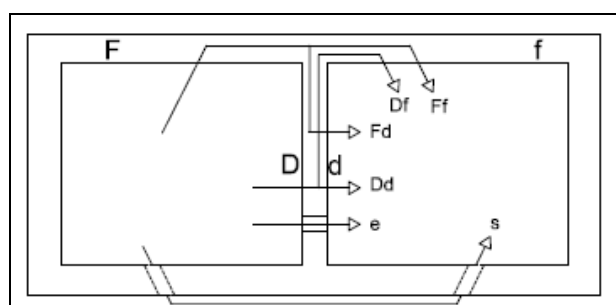


Figura 5.1. Caminos de transmisión acústica ij entre dos recintos. Planta o sección.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Los caminos de transmisión acústica se dividen en:

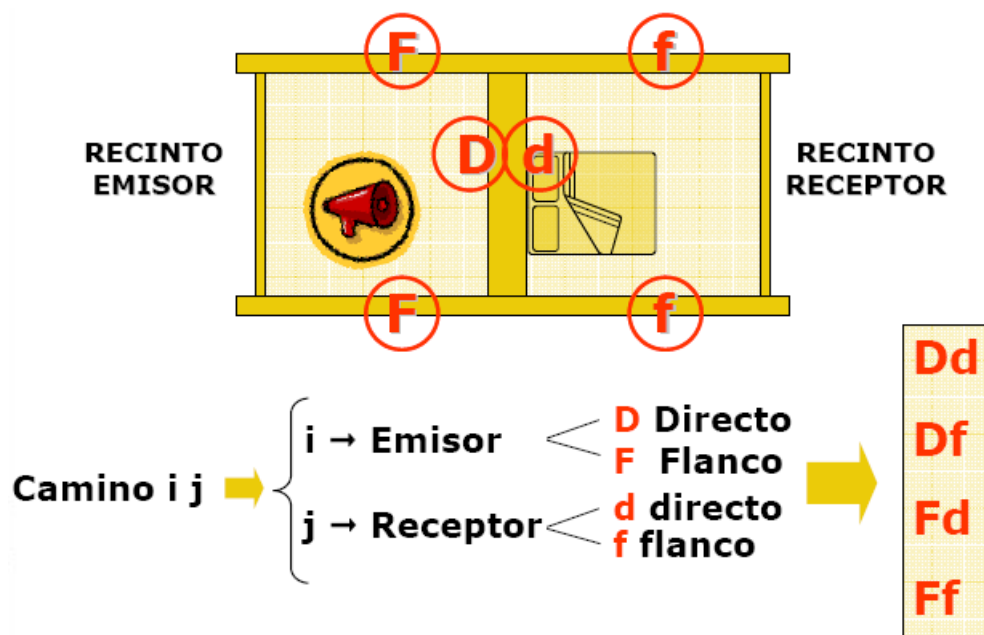
Transmisión directa:

- A través del elemento constructivo de separación. **Dd**
- A través de rejillas o aireadores. **E**

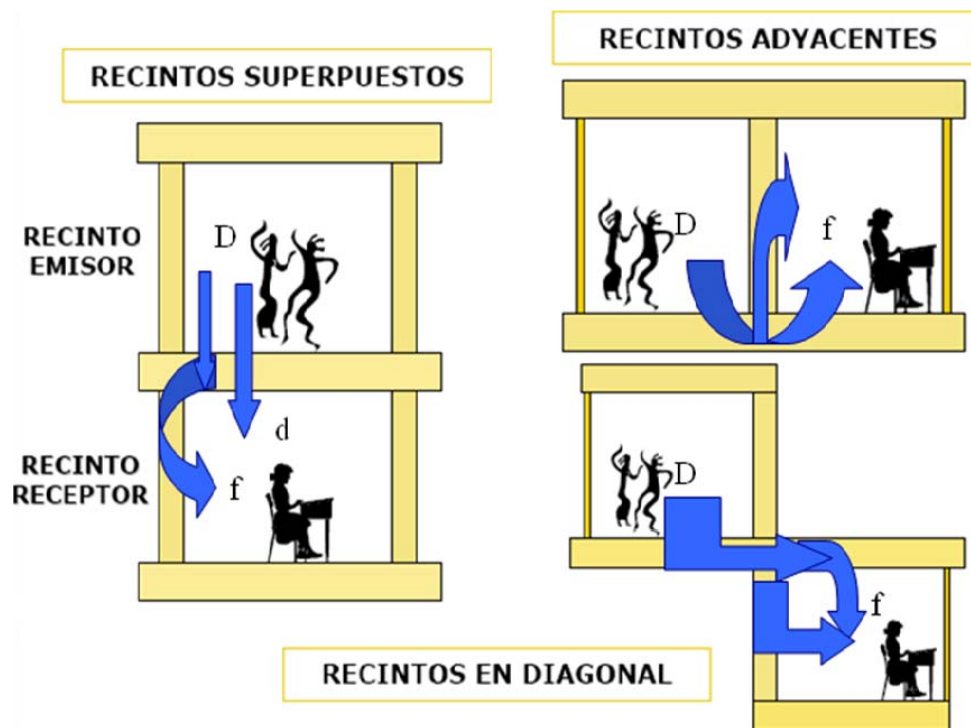
Transmisión indirecta:

- **Aérea indirecta:** Debida a conductos de instalaciones (AA, shunts), falsos techos, suelos técnicos, etc. **s**.
- **Indirecta estructural o por flancos:** Debida a las vibraciones de los elementos adyacentes (de flanco) conectados al elemento de separación principal. **Df, Fd y Ff**.

Por lo tanto si realizamos una identificación de los elementos de flanco y las vías de transmisión del ruido



En el caso de transmisiones para ruido de impacto, la metodología y notación seguida es similar, dando como resultado los siguientes elementos de flanco y vías de transmisión del ruido para los tres tipos de pares de recintos que se contemplan en el documento:



Finalmente, para el diseño de la solución de aislamiento es necesario considerar:

- a) **Los Sistemas constructivos**
 - Todos los del recinto
 - Tipo de elementos constructivos
 - Forma de unión
- b) Se modelan **parejas de recintos** (emisor-receptor)
- c) **Geometría de las parejas**
 - Disposición relativa entre recintos
 - Superficie común
 - Volumen del recinto receptor



1.2 Índices de aislamiento contemplados

En este apartado realizamos un recordatorio de los índices de aislamiento que se utilizan principalmente en el DB-HR para caracterizar los diferentes sistemas constructivos o recintos tanto para ruido aéreo como ruido de impacto.

Dentro de los que caracterizan a los sistemas constructivos tenemos:

- **Ruido aéreo**

Índice de reducción acústica, ponderado A (en laboratorio), R_A

Índice de reducción acústica, ponderado A para ruido de tráfico, R_{Atr}

Mejora del índice de reducción acústica, ponderado A, de un revestimiento, ΔR_A

- **Ruido de impactos**

Nivel global de presión de ruido de impactos normalizado (en laboratorio), L_{nW}

Reducción del nivel global de presión de ruido de impactos de un suelo flotante o techo suspendido (en laboratorio), ΔL_{nW}

En el grupo de los que caracterizan a los recintos tenemos:

- **Ruido aéreo**

Aislamiento a ruido aéreo, la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, (in situ) $D_{nT,A}$

Aislamiento a ruido aéreo, la diferencia de niveles estandarizada (fachadas), ponderada A, para ruido de tráfico (in situ) $D_{2m,nT,Atr}$

- **Ruido de impactos:**

Ruido de impactos, el nivel global de presión de ruido de impactos estandarizado (in situ), $L'_{nT,w}$

1.3 Procedimiento de aplicación de la opción general

El objetivo del método es evaluar y sumar cada uno de los caminos de transmisión del sonido para obtener la estimación del comportamiento del edificio a partir del comportamiento de las soluciones constructivas, tanto a ruido aéreo como a ruido de impactos

Para ello usamos como índices de aislamiento para calcular el índice de reducción acústica aparente, ponderado A, R'_A y el nivel global de presión de ruido de impactos normalizado, L'_{nW} . Los valores finales a obtener son para el aislamiento a ruido aéreo, la diferencia de niveles estandarizada, $D_{nT,A}$ y para ruido de impactos, el nivel global de presión de ruido de impactos, $L'_{nT,w}$. que son los índices para los que el DB-HR establece las exigencias de cumplimiento.

El procedimiento de aplicación de la opción general se resume en el diagrama mostrado en la Figura 5.2.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

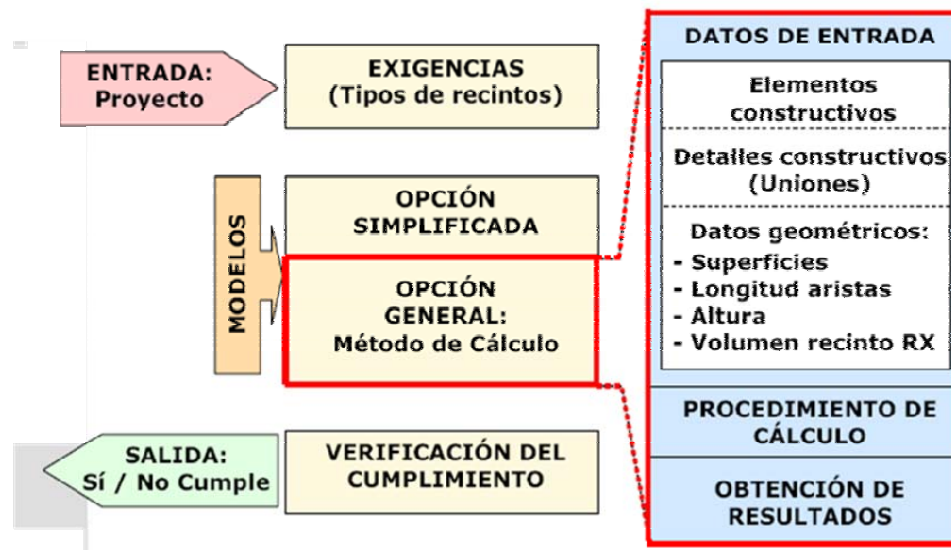


Figura 5.2. Diagrama de procedimiento de la opción general.

Lo primero que debemos realizar es identificar los diferentes **casos de parejas entre recintos** y para cada una de ellas se debe evaluar:

- Transmisiones indirectas.
- Forma del recinto (nos indica total de caminos indirectos).
- Volúmenes y distintas superficies.
- las fachadas, cubiertas y los suelos en contacto con aire exterior.

Para ello, se permiten utilizar las siguientes hipótesis de cálculo:

- Valores para el cálculo medido *in situ*, pero permite hacer **aproximación** a valores de laboratorio.
- Para poder sumar linealmente ΔR_A , la relación de masas entre elemento constructivo base vertical y el revestimiento ≥ 2 .
- Para poder sumar linealmente ΔR_A y ΔL_w , la relación de masas entre del forjado y el suelo flotante ≥ 2 .
- Si no se cumple, se usará R_A y $L_{n,w}$ del conjunto.



2. CÁLCULO DEL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO INTERIOR

2.1 Pasos a seguir

Como guía para obtener la solución constructiva para el aislamiento acústico a ruido aéreo interior se enumeran a continuación los pasos a seguir para el cálculo que serán descritos en apartados siguientes:

PASO 1: QUE TENGO QUE CALCULAR $D_{nT,A}$

PASO 2: CALCULO DEL AISLAMIENTO DEL CAMINO DIRECTO

PASO 3: TRANSMISIONES LATERALES O POR FLANCOS, D_f , F_d , F_f

- Calcular los valores de M
- Calcular los índices K_{ij}
- Calcular los índices de reducción acústica R_{ij}

PASO 4: SUMA DE TODOS LAS CAMINOS R'_A

PASO 5: CORRECCIÓN POR GEOMETRÍA $D_{nT,A}$

2.2 Índice a calcular

El Índice a calcular en este caso es la diferencia de niveles estandarizada ponderada A, recordamos su definición:

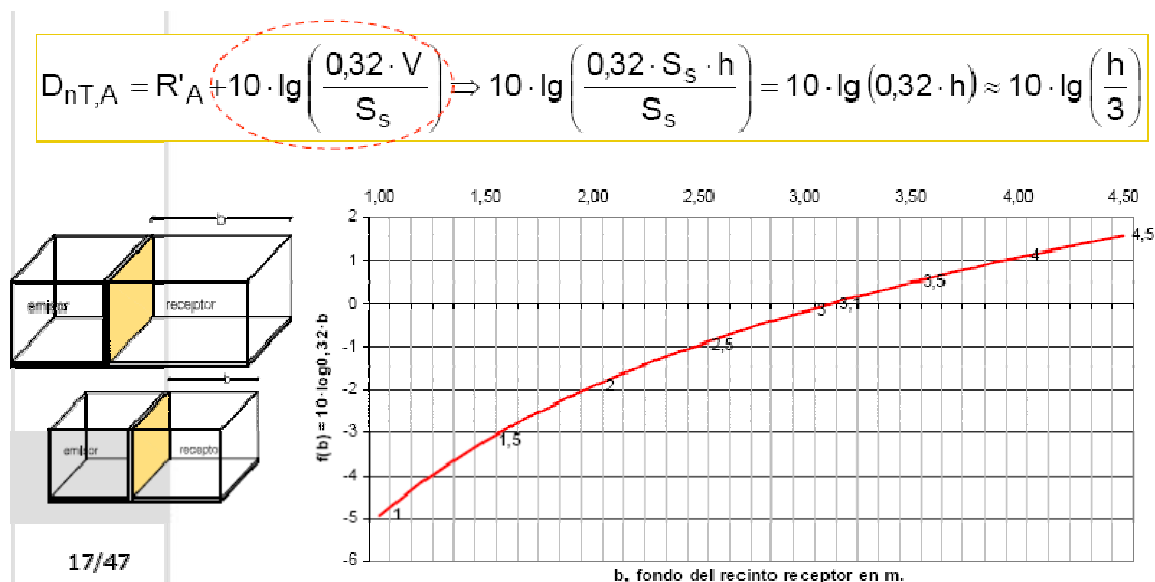
$$D_{nT,A} = R'_A + 10 \cdot \lg \left(\frac{0,32 \cdot V}{S_s} \right)$$

- R'_A : índice global de reducción acústica aparente, ponderado A, [dBA].

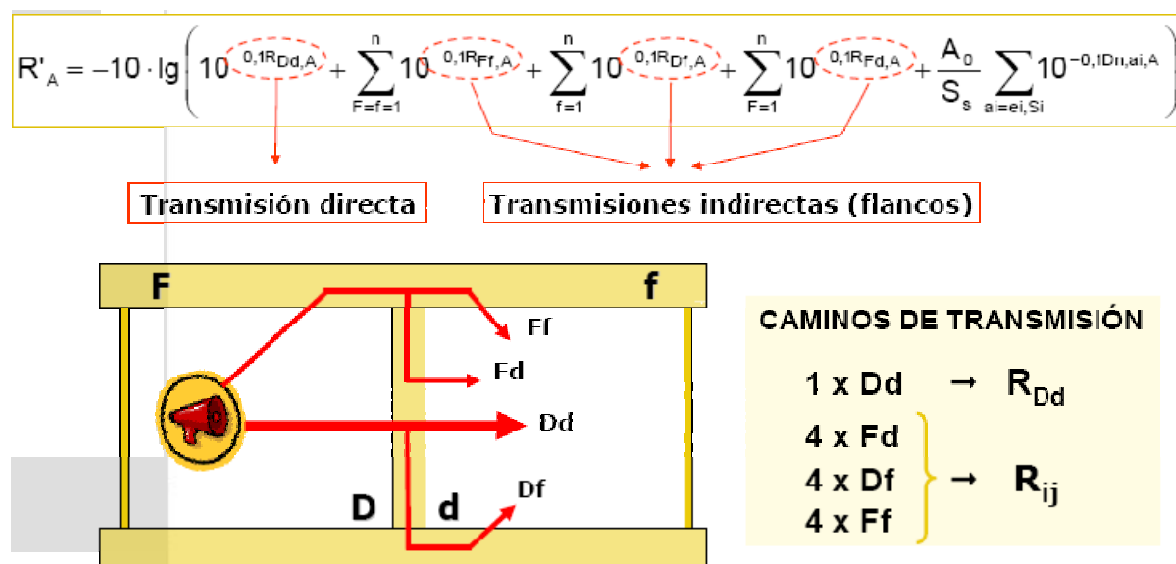
Corrección geométrica:

- V : volumen del recinto receptor, [m³];
- S_s : área compartida del elemento de separación, [m²],

Nuestra recomendación es realizar una selección de los recintos más desfavorables. Tras varias experiencias de cálculo, en la siguiente figura podemos observar como el recinto receptor de tamaño más pequeño es el más desfavorable en la corrección geométrica.



Por lo tanto el diseño principal se basa en obtener un valor para R'_A a través de la formula siguiente y después aplicar una corrección según las dimensiones del local receptor.



Donde

- $R_{Dd,A}$ índice global de reducción acústica para la transmisión directa, dBA;



- $R_{Ff,A}$ índice global de reducción acústica para la transmisión indirecta en el camino Ff, dBA;
- $R_{Df,A}$ índice global de reducción acústica para la transmisión indirecta, en el camino Df, dBA;
- $R_{Fd,A}$ índice global de reducción acústica para la transmisión indirecta, en el camino Fd, dBA;
- $D_{nai,A}$ diferencia de niveles normalizada, ponderada A, para la transmisión de ruido aéreo por vía indirecta, a través de elementos constructivos pequeños; (ej. Rejilla de ventilación o conducto de aire acondicionado)
- n número de elementos de flanco del recinto; normalmente suele ser 4.
- S_s área compartida del elemento de separación, m²;
- A_0 área de absorción equivalente de referencia, igual a 10 m².

Observamos que se debe calcular la R de cada camino a través de:

$R_{\text{cada camino}} = \text{Aislamiento laboratorio} + \text{Atenuación juntas} + \text{Término corrección}$

Aislamiento Laboratorio = Valores globales y mejoras por recubrimientos

Atenuación Juntas = K_{ij}

Término corrección = Geometría

2.3 Cálculo de aislamiento del camino directo

Para el cálculo del aislamiento del camino directo o transmisión directa se usan los valores de aislamiento del elemento constructivo.

$R_{Dd,A} = R_{S,A} + \Delta R_{Dd,A}$

■ Si tiene un único trasdosado

$\Delta R_{Dd,A} = \Delta R_{D,A}$ ó $\Delta R_{Dd,A} = \Delta R_{d,A}$

■ Con dos trasdosados

$\Delta R_{Dd,A} = \Delta R_{D,A} + \frac{\Delta R_{d,A}}{2}$ ó $\Delta R_{Dd,A} = \Delta R_{d,A} + \frac{\Delta R_{D,A}}{2}$

2.4 Transmisiones laterales o por flancos

Los doce diferentes caminos de transmisión indirectos requieren su cálculo individualmente a través de la siguiente fórmula:

$$R_{Df,A} = \frac{R_{S,A} + R_{f,A}}{2} + \Delta R_{Df,A} + K_{Df} + 10 \cdot \lg \frac{S_s}{l_0 l_f}$$

1 Aislamiento en laboratorio de los elementos constructivos

2 Atenuación en las uniones

3 Geometría

1. Aislamiento en laboratorio de los elementos constructivos

En la figura siguiente se muestra un ejemplo de cálculo de una transmisión por flanco donde se observan los valores que debe tomar cada uno de los términos que forma la ecuación del método:

$$R_{Df,A} = \frac{R_{S,A} + R_{f,A}}{2} + \Delta R_{Df,A} + K_{Df} + 10 \cdot \lg \frac{S_s}{l_0 l_f}$$

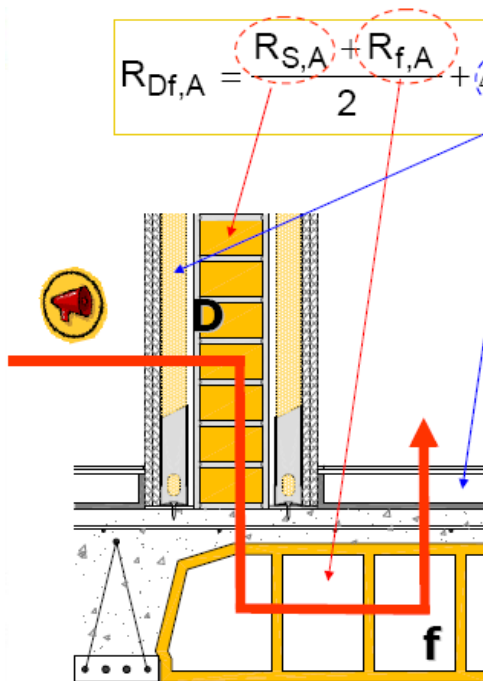
R_A Elemento base ESV

R_A Forjado

ΔR_A Trasdoso

ΔR_A Suelo flotante

$$\Delta R_{ij,A} = \Delta R_{i,A} + \frac{\Delta R_{j,A}}{2}$$

$$\Delta R_{ij,A} = \Delta R_{j,A} + \frac{\Delta R_{i,A}}{2}$$


2. Atenuación en las uniones

La definición de las diferentes tipologías de uniones y su cálculo están descritos en el Anejo D del DB-HR. Cada unión o el amortiguamiento de la unión dependen de:

- La forma (en T o en +)
- Tipo de elementos constructivos
 - De yeso laminado/ fábrica
 - La existencia o no de bandas elásticas
- Se modela mediante el índice K_{ij}

Pueden obtenerse los índices de reducción de vibraciones, K_{ij} , en uniones de elementos constructivos para los distintos tipos de uniones; a partir de varias expresiones que se pueden encontrar en ese **Anejo D**, en función de la magnitud M , definida como la relación de masas:

$$M = \lg \frac{m'_{\perp i}}{m'_i}$$

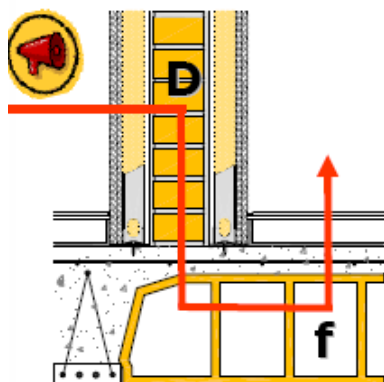
m'_i : m elemento i en el camino de transmisión ij

$m'_{\perp i}$: m elemento perpendicular al i

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo para un caso concreto de unión rígida en T de elementos homogéneos:

$$R_{Df,A} = \frac{R_{S,A} + R_{f,A}}{2} + \Delta R_{Df,A} + K_{Df} + 10 \cdot \lg \frac{S_s}{l_o l_f}$$

Unión rígida en T de *elementos homogéneos*:



$$K_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7 \cdot M^2 \text{ dB; } 0 \text{ dB/octava}$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7 \cdot M^2 (=K_{23}) \text{ dB; } 0 \text{ dB/octava}$$

$$M = \lg \left(\frac{m_{\text{forjado}}}{m_{\text{sep}}} \right) = \lg \left(\frac{305}{161} \right) = 0,277$$

ESV: 1/2p LP. $m=m_2=161 \text{ kg/m}^2$

Forjado: Unidireccional 25+5.
Bovedilla cerámica. $m=m_1=305 \text{ kg/m}^2$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7 \cdot 0,277^2 = 6,14 \text{ dB}$$

3. Término Corrector por Geometría

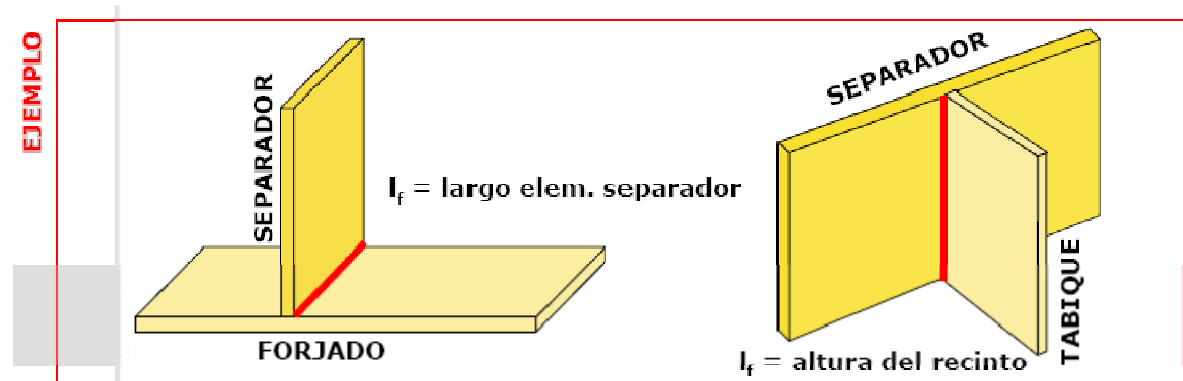
Por último se le aplica el término de corrección por geometría, en este caso depende de las dimensiones de la partición separadora que se encuentra en contacto:

$$R_{Df,A} = \frac{R_{S,A} + R_{f,A}}{2} + \Delta R_{Df,A} + K_{Df} + 10 \cdot \lg \frac{S_s}{l_o l_f}$$

S_s área compartida del elemento de separación, m^2 ;

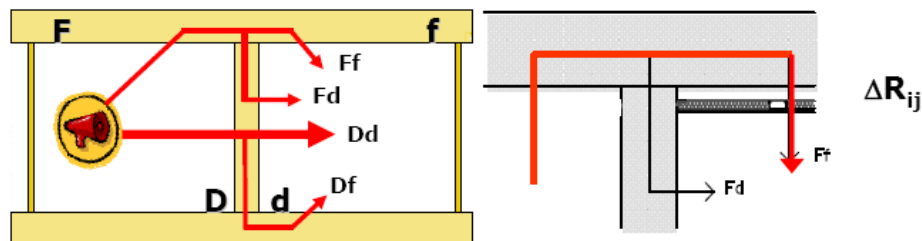
l_f longitud común de la arista de unión entre el elemento de separación y los elementos de flanco, m

l_0 longitud de la arista de unión de referencia, igual a 1m



Como resumen de las **transmisiones indirectas** o por flancos tenemos:

$$R_{ij} \left\{ \begin{array}{l} - Ff \Rightarrow R_{Ff,A} = \frac{R_{F,A} + R_{f,A}}{2} + \Delta R_{Ff,A} + K_{Ff} + 10 \cdot \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \\ - Df \Rightarrow R_{Df,A} = \frac{R_{S,A} + R_{f,A}}{2} + \Delta R_{Df,A} + K_{Df} + 10 \cdot \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \\ - Fd \Rightarrow R_{Fd,A} = \frac{R_{F,A} + R_{S,A}}{2} + \Delta R_{Fd,A} + K_{Fd} + 10 \cdot \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \end{array} \right.$$



2.5 Suma de todos los caminos y corrección por geometría

Finalmente, ya podemos calcular R'_A (12 posibles vías indirectas + 1 vía directa):

$$R'_A = -10 \cdot \lg \left(10^{-0,1R_{Dd,A}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-0,1R_{Ff,A}} + \sum_{f=1}^n 10^{-0,1R_{Df,A}} + \sum_{F=1}^n 10^{-0,1R_{Fd,A}} + \frac{A_0}{S_s} \sum_{ai=ei, Si} 10^{-0,1D_{n,ai,A}} \right)$$

Y después obtener la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A.

$$D_{nT,A} = R'_A + 10 \cdot \lg \left(\frac{0,32 \cdot V}{S_s} \right)$$



3. CÁLCULO DEL AISLAMIENTO A RUIDO DE IMPACTOS

3.1 Pasos a seguir

Como guía para obtener la solución constructiva para el aislamiento acústico a ruido de impactos se enumeran a continuación los pasos a seguir para el cálculo que serán descritos en apartados siguientes:

PASO 1: QUE TENGO QUE CALCULAR $L'_{nT,w}$

PASO 2: CALCULO DEL NIVEL DE IMPACTOS DEL CAMINO DIRECTO (si lo hay)

PASO 3: CÁLCULO DE LAS TRANSMISIONES INDIRECTAS

- Calcular los valores de **M**
- Calcular los índices **K_{ij}**
- Calcular los niveles de ruido de impacto por vía indirecta acústica **L_{nw,ij}**

PASO 4: SUMA DE TODOS LAS CAMINOS $L'_{n,w}$

PASO 5: CORRECCIÓN POR GEOMETRÍA $L'_{nT,w}$

3.2 Índice a calcular

En este caso los caminos son distintos que en caso de ruido aéreo, pudiendo no existir camino directo. Esta vez, consiste en sumar niveles sonoros causados por cada camino siendo en este caso el Índice a calcular Nivel global de presión de ruido de impactos estandarizado, recordamos su definición:

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10 \cdot \lg(0,032 \cdot V)$$

- L'_{nw} : nivel global de presión de ruido de impactos normalizado (dB)
- Corrección geométrica:
- V: Volumen del recinto receptor (m³)

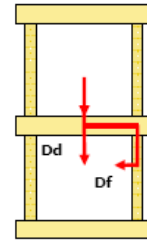
Otra vez nuestra recomendación es realizar una selección de parejas de recintos para el caso más desfavorable. Recordamos en la siguiente figura los casos de caminos de transmisión que nos podemos encontrar.

■ Recintos superpuestos

$$L'_{n,w} = 10 \cdot \lg \left(10^{0,1L_{n,w,d}} + \sum_{j=1}^n 10^{0,1L_{n,w,ij}} \right)$$

Transmisión directa

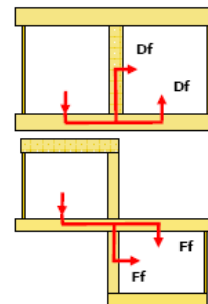
Transmisiones indirectas (flancos)



■ Recintos al mismo nivel y en diagonal

$$L'_{n,w} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{j=1}^n 10^{0,1L_{n,w,ij}} \right)$$

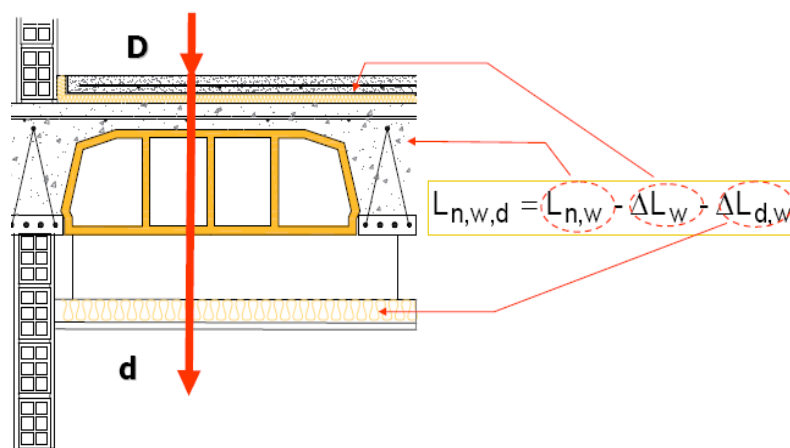
Transmisiones indirectas (flancos)



3.3 Cálculo del nivel de impactos del camino directo

Se debe incluir en la transmisión directa las mejoras por añadir suelo flotante y techo suspendido

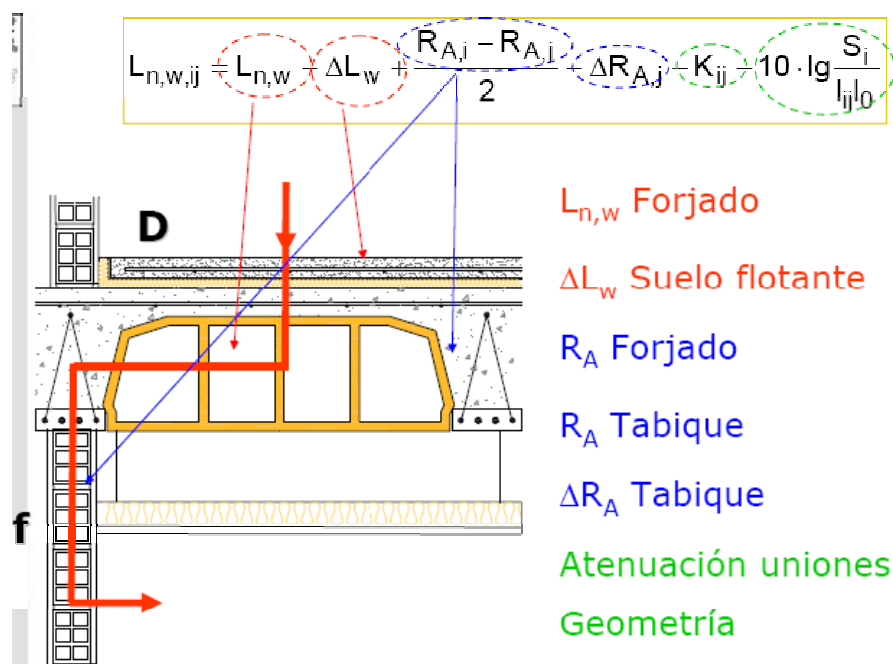
$$L'_{n,w} = 10 \cdot \lg \left(10^{0,1L_{n,w,d}} + \sum_{j=1}^n 10^{0,1L_{n,w,ij}} \right)$$





3.4 Cálculo de las transmisiones indirectas

De forma similar al aislamiento a ruido aéreo, pero teniendo en cuenta que estamos tratando índices diferentes, se obtiene el nivel aportado por cada uno de los caminos de transmisión indirecta que puedan existir según el caso.



3.5 Suma de todos los caminos y corrección por geometría

Finalmente, ya podemos calcular $L'_{n,w}$ como combinación de la posible transmisión directa, si existe, y las posibles vías indirectas, para después obtener nivel global de presión de ruido de impactos estandarizado $L'_{nT,w}$.



4. CÁLCULO AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO EXTERIOR

4.1 Pasos a seguir

Como guía para obtener la solución constructiva para el aislamiento acústico a ruido aéreo exterior se enumeran a continuación los pasos a seguir para el cálculo que serán descritos en apartados siguientes:

PASO 1: QUE TENGO QUE CALCULAR $D_{2m,nT,Atr}$

PASO 2: CALCULO DEL AISLAMIENTO MIXTO $R_{m,A}$

– Transmisiones indirectas despreciables (2 dB)

PASO 3: AIREADORES (si los hay)

PASO 4: CORRECCIÓN POR LA FORMA DE LA FACHADA ΔL_{fs}

PASO 5: CORRECCIÓN POR GEOMETRÍA $D_{2m,nT,A}$

PASO 6: CORRECCIÓN PARA RUIDO DE TRÁFICO $D_{2m,nT,Atr}$

4.2 Índice a calcular

En este caso no referimos fundamentalmente al cálculo de la fachada exterior y las cubiertas transitables. Esta vez, consiste en calcular la **Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, de la fachada para ruido de tráfico**, recordamos su definición:

$$D_{2m,nT,Atr} = D_{2m,nT,A} + C_{tr}$$

$$D_{2m,nT,A} = R'_A + \Delta L_{fs} + 10 \cdot \lg \frac{V}{6T_0 S}$$

Donde,

C_{tr} : Coeficiente de adaptación espectral del elemento más débil (normalmente ventana).

ΔL_{fs} : Influencia de la forma de la fachada

V: Volumen del recinto

S: Área total de fachada vista desde el interior

T_0 : Tiempo de reverberación de referencia (0,5 s, para viviendas)



Debemos recordar que la fachada suele ser un elemento mixto, compuesto por una parte ciega (ladrillo, hormigón, etc.) y una parte de huecos (ventanas principalmente). Por lo tanto este cálculo se convierte en obtener en primer lugar el índice global de reducción acústica aparente R'_A debida a la vía directa y vías indirectas como hemos visto en apartados anteriores:

$$R'_A = -10 \cdot \lg \left(10^{-0,1R_{Dd,A}} + \sum_{F=1}^n 10^{-0,1R_{Fi,A}} + \sum_{I=1}^n 10^{-0,1R_{Di,A}} + \sum_{F=1}^n 10^{-0,1R_{Fd,A}} + \frac{A_0}{S_0} \sum_{i=1}^n 10^{-0,1R_{ni,A}} \right)$$

**Transmisión directa:
Aislamiento mixto**

**Transmisiones
indirectas (flancos)**

**Rejillas de ventilación
Aireadores**

Para después obtener el aislamiento mixto de la transmisión directa mediante:

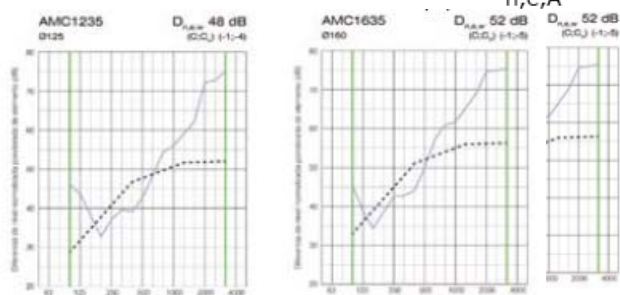
$$R_{m,A} = -10 \cdot \lg \left(\sum_{j=1}^n \frac{S_j}{S} \cdot 10^{\frac{-R_{i,A}}{10}} \right)$$

4.3 Influencia aireadores

Especial atención requiere un elemento novedoso conocido como aireador $D_{n,e,A}$ cuya aportación es fundamental para el índice final obtenido. Si el aireador no posee tratamiento acústico utilizaremos la siguiente fórmula y para aireadores con tratamiento acústico se utilizarán valores obtenidos de ensayo en laboratorios:

$$D_{n,e,A} = -10 \cdot \lg \left(\frac{S_0}{10} \right)$$

$D_{n,e,A}$ ensayo



Donde S_0 es el área ocupada por el aireador.



4.4 Influencia de la forma de fachada

Otra característica a tener en cuenta en el diseño de la fachada es su forma, pues influye directamente en el aislamiento obtenido. El método incorpora un término corrector cuyo valor podemos obtener de una tabla que aparece en el **Anejo F** del DB-HR. A continuación se muestra un extracto de esa tabla:

ΔL_{fs} dB														
Absorción acústica del techo (α_a)		No se aplica	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$
Línea de mira sobre la fachada:	<1,5 m	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1	No se aplica		
	1,5-2,5 m	0	No se aplica			-1	0	2	0	1	3			
	> 2,5 m	0				1	1	2	2	2	3	3	4	6

5. RUIDO Y VIBRACIONES DE LAS INSTALACIONES

5.1 Introducción

El DB-HR utiliza una estrategia **prescriptiva** con respecto al ruido y vibraciones provocadas por máquinas e instalaciones del edificio. Consiste en dar unos consejos o recomendaciones a seguir para la instalación de diferente equipamiento así como dar unos niveles máximos de emisión que no deben alcanzar las máquinas dependiendo del tipo que sean.

Contiene condiciones de instalación de las máquinas y equipos generadores de ruido en un edificio así como los valores de aislamiento de los recintos que albergan las instalaciones dividiéndose en:

- Equipos generadores de ruido estacionario (calderas, compresores, ..)
- Conducciones y equipamiento.

El apartado 3.3 del DB-HR incluye toda la información sobre este asunto que se puede resumir en los apartados siguientes.



5.2 Datos previos

Los suministradores de los equipos y productos incluirán en la documentación de los mismos los valores de las magnitudes que caracterizan los ruidos y las vibraciones procedentes de las instalaciones de los edificios:

- a) el nivel de potencia acústica, L_w , de equipos que producen ruidos estacionarios, como bombas impulsoras, rejillas de aire acondicionado, calderas, quemadores, etc.;
- b) la rigidez dinámica, s' , y la carga máxima, m , de los lechos elásticos utilizados en las bancadas de inercia;
- c) el amortiguamiento, C , la transmisibilidad, τ , y la carga máxima m , de los sistemas antivibratorios puntuales utilizados en el aislamiento de maquinaria y conductos;
- d) el coeficiente de absorción acústica, α , de los productos absorbentes utilizados en conductos de ventilación y aire acondicionado;
- e) la atenuación de conductos prefabricados, expresada como pérdida por inserción, D , y la atenuación total de los silenciadores que estén interpuestos en conductos, o empotrados en fachadas o en otros elementos constructivos.

5.3 Equipos generadores de ruido estacionario

Se consideran equipos generadores de ruido estacionario los quemadores, las calderas, las bombas de impulsión, la maquinaria de los ascensores, los compresores, etc....

Las condiciones de montaje incluyen la necesidad de poner soportes antivibratorios elásticos (según UNE 100153 IN) o bancadas de inercia de hormigón para resistir los esfuerzos causados por la función del motor, ventilador, bomba, etc. También se instalarán conectores flexibles a la entrada y salida de las tuberías, silenciadores a las salidas de humo y las bombas de impulsión sumergidas.

- Equipos situados en recintos de instalaciones.

$$L_w \leq 70 + 10 \cdot \log V - 10 \cdot \log T + K \tau^2$$

Nivel de potencia acústica de emisión
en dB;

V volumen del recinto de
instalaciones, en m³;

T tiempo de reverberación del
recinto;

K índice de reducción de
vibraciones;

τ transmisibilidad del sistema
antivibratorio
soporte de la instalación



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

Tabla 3.6 Valores de K y τ de los sistemas antivibratorios

Tipo de equipo	K	Valor de la transmisibilidad, τ , máximo del sistema antivibratorio
Calderas	12,5	0,15
Bombas de impulsión	12,5	0,10
Maquinaria de los ascensores	1000	0,01

- Equipos situados en recintos protegidos

$$L_W \leq L_{eqA,T}$$

Tabla 3.7 Valores del *nivel sonoro continuo equivalente estandarizado, ponderado A*, $L_{eqA,T}$

Uso del edificio	Tipo de recinto	Valor de $L_{eqA,T}$ (dBA)
Sanitario	Estancias	35
	Dormitorios y quirófanos	30
	Zonas comunes	40
Residencial	Dormitorios y estancias	30
	Zonas comunes y servicios	50
Administrativo	Despachos profesionales	40
	Oficinas	45
	Zonas comunes	50
Docente	Aulas	40
	Sala lectura y conferencias	35
	Zonas comunes	50
Cultural	Cines y teatros	30
	Salas de exposiciones	45
Comercial		50

- Equipos situados en cubiertas y zonas exteriores.

Indica que el nivel de potencia acústica máximo será tal que en el entorno del equipo y en los recintos habitables y protegidos colindantes no superen los objetivos de calidad correspondientes.

5.4 Conducciones y equipamiento

- Hidráulicas.
 - o Recomendaciones sobre cómo deben llevarse los conductos.
 - o Aire acondicionado.
- Revestir conductos con material absorbente y usar silenciadores.
 - o Evitar paso vibraciones.

$$L_W \leq L_{eqA,T} + 10 \cdot \log V - 10 \cdot \log T - 14$$

L_W nivel de potencia acústica de la rejilla, en dB;
 $L_{eqA,T}$ valor del nivel sonoro continuo equivalente estandarizado, ponderado A, en función del uso del edificio y del tipo de recinto, en dBA;
 T tiempo de reverberación del recinto;
 V volumen del recinto.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

- Ventilación.
 - o Recomendaciones sobre cómo deben discurrir los conductos.
 - o Eliminación de residuos.
 - o Poner antivibratorios para estos sistemas.
- Ascensores y montacargas.
 - o Recomendaciones de cómo montar estos equipos.

6. HERRAMIENTA DE CÁLCULO DEL DB-HR

6.1 Introducción

Para la aplicación de la opción general de forma completa y exhaustiva era necesaria la creación de una herramienta informática de ayuda para la realización de los cálculos. Para ello, presentaremos la Herramienta Excel del DB-HR del CTE.

A la hora de su creación se plantearon los siguientes requisitos:

- Herramienta Excel, para facilidad de manejo y extensión.
- Sin Macros, para poder ejecutarse en cualquier plataforma hardware.
- Necesidad de una herramienta de **AYUDA** al cálculo. Aclarar que únicamente calcula, no interpreta resultados. Para eso siguen estando los proyectistas.
- Sencillo y de fácil manejo, todo el mundo conoce el entorno Excel.
- Vocación docente:
 - Permite explicar el método de cálculo
 - Se indican las ecuaciones que se han implementado
 - Código abierto, no hay celdas protegidas y ocultas en la programación de ecuaciones.
- Flexible, para ser ampliable tanto en Catalogo de Elementos Constructivos como de uniones Kij.
- El usuario puede introducir sus propios elementos.

Estas decisiones tomadas tuvieron unas consecuencias:

- La diferente casuística de encuentro entre recintos, sería imposible programar sin macros, por lo que se desarrollan varias hojas de cálculo.
- Implementación en una única hoja Excel, provocaría un difícil manejo.
- Decisión tomada: Crear un menú de arranque en html que permite identificar fácilmente el caso y arrancar la hoja correspondiente.
- La interpretación del caso, asignación de la geometría real al caso simbolizado en la herramienta, recae en el usuario.
- Problema: las actualizaciones.
 - Cada actualización requiere cambiar todas las hojas.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

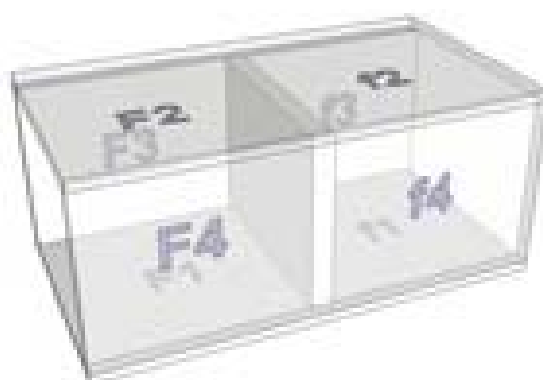
Acústica Arquitectónica

- Aunque únicamente se podría realizar abriéndolas y “cortar y pegar”.

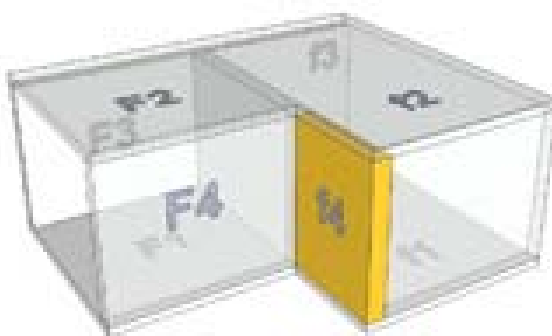
La herramienta se puede encontrar en las siguiente Páginas web de interés:

- <http://www.codigotecnico.org/>
- <http://www.codigotecnico.org/index.php?id=631>
- <http://www.codigotecnico.org/index.php?id=632>

La notación de la herramienta es la misma que la del código y en las UNE 12354. Identificando, F: Flanco del recinto emisor y f: Flanco del recinto receptor.



También se usan elementos destacados en color para identificar el tipo de unión (casuística). Indican que en el cálculo, la unión debe interpretarse de una forma “especial”



Nuestro trabajo inicial será reconocer el tipo de casuística en la que nos encontramos para poder elegir la hoja de cálculo adecuada.

Se completa la información dada en este apartado con el primer apartado de la presentación de diapositivas (en pdf) en la documentación técnica complementaria (carpeta doc principal) donde se presenta un ejemplo de cálculo donde se observará como una elección de diferente caso puede dar lugar a un resultado de aislamiento diferente, tanto que uno puede cumplir el CTE y otro no. El proyectista tiene la responsabilidad de seleccionar el tipo de caso más “parecido y adecuado” a la distribución real del edificio.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica

También se presenta una solución de software comercial de las que existen en la actualidad y que será tema de debate en uno de los foros de este tema.

7. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA OPCIÓN GENERAL

En el apartado 2 de la presentación de diapositivas (en pdf) incluida en la documentación técnica complementaria (carpeta doc. principal) están desarrollados varios ejemplos prácticos de diseño de aislamiento acústico cuya lectura es recomendada. Debido a la cantidad de tablas, gráficas y fotografías utilizadas se ha preferido exponer en este formato. En algunos de ellos se hace uso de la aplicación basada en hojas de cálculo ofrecida por el ministerio.

En concreto encontrareis los siguientes ejemplos:

- Cálculo de ruido exterior.
- Cálculo de ruido interior aéreo.
- Cálculo de ruido interior impacto.

Además se recomienda visualizar los tutoriales animados sobre la herramienta del ministerio que os servirán de ayuda para la realización del trabajo.

Finalmente se adjunta en la documentación un proyecto de aislamiento según CTE donde se desglosa el cálculo mediante las distintas opciones explicadas y cuya lectura y análisis es recomendado.

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA (T6)

CONTROL DE EJECUCIÓN Y CERTIFICACIÓN DE OBRA TERMINADA.

Acústica Arquitectónica

Edición 2009-2010

Profesor: Juan M. Navarro

UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN ANTONIO DE MURCIA



Contenido

1. EQUIPOS DE MEDICIÓN.....	4
1.1 Introducción.....	4
1.2 Micrófonos.....	4
1.3 Medidor de nivel sonoro.....	4
1.4 Analizadores de espectro.....	6
1.5 Filtros de Bandas de frecuencia	7
1.6 Conversión de bandas	9
1.7 Instrumentos integradores y estadísticos	12
1.8 Calibradores	12
1.9 Fuente sonora onmidireccional.....	13
1.10 Máquina de impactos.....	14
1.11 Software	14
1.12 Otros.....	15
2. MEDICIONES ACÚSTICAS	17
2.1 Introducción.....	17
2.2 Generalidades.....	21
2.3 Redes de ponderación de frecuencia	23
2.4 Respuesta temporal	26
2.5 Documento de Certificación acústica.....	29
3. DEFINICIONES DE PARÁMETROS	30
4. CONTROL DE EJECUCIÓN EN EL DB-HR	31
4.1 Control de recepción de productos	31
4.2 Control de ejecución	34
5. ENUNCIADO PROBLEMAS	39
5.1 Problema 1	39
5.2 Problema 2	39
5.3 Problema 3	39
5.4 Problema 4	39
5.5 Problema 5	40
5.6 Problema 6	40
6. SOLUCIONES PROBLEMAS	40
6.1 Problema 1	40
6.2 Problema 2	41



6.3 Problema 3	41
6.4 Problema 4	41
6.5 Problema 5	41
6.6 Problema 6	43



1. EQUIPOS DE MEDICIÓN

1.1 Introducción

El **micrófono** es el *transductor* que transforma la señal acústica (sonido) en señal eléctrica; más precisamente, transforma presión sonora en tensión eléctrica. Aunque existen diversos métodos de conversión (electromagnética, piezoeléctrica, electrostática), en instrumentos de medición se utilizan casi exclusivamente los micrófonos electrostáticos, es decir los **micrófonos de condensador**, o **micrófonos capacitivos**, por tener excelentes características de respuesta en frecuencia y tener ruido propio relativamente bajo.

1.2 Micrófonos

El **micrófono** es el *transductor* que transforma la señal acústica (sonido) en señal eléctrica; más precisamente, transforma presión sonora en tensión eléctrica. Aunque existen diversos métodos de conversión (electromagnética, piezoeléctrica, electrostática), en instrumentos de medición se utilizan casi exclusivamente los micrófonos electrostáticos, es decir los **micrófonos de condensador**, o **micrófonos capacitivos**, por tener excelentes características de respuesta en frecuencia y tener ruido propio relativamente bajo.

1.3 Medidor de nivel sonoro

El **medidor de nivel sonoro**, también denominado **sonómetro** o **decibelímetro** es el instrumento de medición acústica más simple, y por esa razón, el más difundido. Está orientado a determinar el **nivel sonoro**, es decir el nivel de presión sonora con intercalación de una adecuada red de compensación (o ponderación) de frecuencias. En la figura 6.9 se muestra el diagrama de bloques de un medidor de nivel sonoro.

El micrófono toma la presión sonora $p(t)$ y la convierte en una tensión $v_m(t)$, que es amplificada por un amplificador. Luego sigue un atenuador, que permite la selección de escala. Esto es necesario dado que en general el rango dinámico¹ de algunos de los bloques que siguen no es tan alto como el que se pretende para el instrumento completo (por ejemplo, son comunes los medidores que permiten medir desde **30 dBA** hasta **130 dBA**, lo que corresponde a un rango dinámico de **100 dB**). Seguidamente, se tiene un filtro cuya finalidad es realizar la ponderación seleccionada (**A**, **B**, **C**, etc.), cuya salida es tratada por el cuadrador. Luego aparece el filtro pasabajos cuya constante de tiempo, en general seleccionable, permite distintas respuestas temporales del instrumento. A la salida de este filtro se tiene el valor eficaz al cuadrado.

¹ El **rango dinámico** es la diferencia en **dB** entre el máximo y el mínimo nivel de señal que es capaz de manejar un dispositivo en condiciones operativas adecuadas (por ejemplo, sin distorsionar o cambiar su forma de operación, o sin resultar demasiado ruidoso comparado con la señal a procesar).

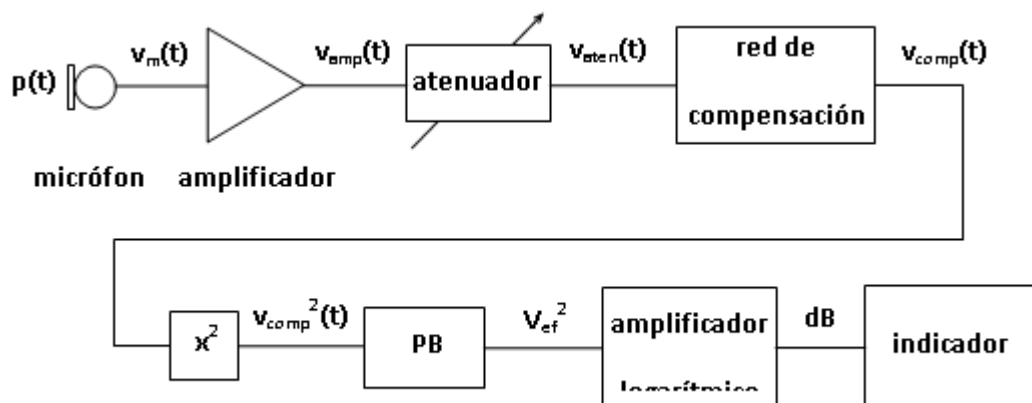


Figura 6.1. Diagrama de bloques de un medidor de nivel sonoro.

El amplificador logarítmico se encarga de transformar el valor eficaz en dBA, y el indicador presenta el valor medido. En general el indicador es digital, y tiene intercalado un conversor analógico digital.

Existen algunas variantes de este esquema. Por ejemplo, en los instrumentos más económicos no existe amplificador logarítmico. Utilizan un indicador analógico de aguja con una graduación no lineal que realiza simultáneamente la radicación y la logaritmicación en forma gráfica. En estos casos cada rango abarca no más (y en general menos) de **20 dB**,² lo cual obliga a disponer de una gran cantidad de rangos, y además dificulta la medición de ruidos cuyo nivel varía rápidamente entre límites amplios. En el otro extremo de la escala de precios, tenemos instrumentos con funciones como el almacenamiento de datos digitales, en general con la posibilidad de volcado de datos a una computadora personal, o como el procesamiento estadístico de las mediciones. Entre las funciones especiales pueden hallarse la indicación de **sobrecarga** (overload), que advierte que el nivel máximo de un determinado rango (o del instrumento completo) ha sido superado, o la selección automática del rango (**autorango**). También puede proveerse la detección y retención de picos.

Los parámetros relativos a la respuesta frecuencial (redes de compensación) y temporal (velocidad de respuesta) de los medidores de nivel sonoro son los ya estudiados en forma general en las secciones anteriores. Así, tenemos que en general los instrumentos proveen las escalas **A** y **C**, a las que se agrega en algunos casos una escala impropriadamente llamada **lineal** (sería preferible denominarla **plana**), cuya respuesta en frecuencia es constante prácticamente en todo el rango audible, y por lo tanto permite determinar el nivel de presión sonora. Con respecto a la velocidad de respuesta, habitualmente se dispone de las respuestas **rápida** ($\tau = 125 \text{ ms}$) y **lenta** ($\tau = 1 \text{ s}$), y en casos especiales respuesta **impulsiva** ($\tau = 35 \text{ ms}$ para la subida y $1,5 \text{ s}$ para la bajada).

Entre las aplicaciones del medidor de nivel sonoro se encuentran las mediciones requeridas en la aplicación de diversos criterios, recomendaciones, normas, reglamentaciones, legislaciones, etc., así como todo tipo de mediciones tendientes a evaluar el nivel de ruido a fin de elaborar estrategias para su reducción.

Los medidores de nivel sonoro más confiables responden a diversas normas nacionales e internacionales, como la norma IEC 651 (1979) de la International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional), y la ANSI S 1.4-1983, del American National Standards Institute (Instituto Nacional Norteamericano de Normas). Los instrumentos se clasifican en tipos según su precisión. Así, los de Tipo 0 son los de mayor precisión, es decir los que satisfacen tolerancias más estrechas ($\pm 0,7 \text{ dB}$ entre 100 Hz y 4 kHz). Su campo de aplicación son las mediciones acústicas de laboratorio. Los de Tipo 1 son de

² Una variación de **20 dB** corresponde a una variación de V_{ef}^2 de **100** a **1**, la máxima que puede representarse en un instrumento analógico de aguja con razonable precisión.



precisión algo menor (± 1 dB entre 100 Hz y 4 kHz), y son aptos para mediciones de certificación para la aplicación de legislaciones. Los de Tipo 2 son de menor precisión ($\pm 1,5$ dB entre 100 Hz y 1,25 kHz), y se utilizan en mediciones generales de comprobación, o cuando la fluctuación de un determinado ruido hace imposible una determinación precisa.

Es importante distinguir aquellos instrumentos en cuyas especificaciones se lee “diseñado para cumplir con la/las norma/normas...” de los que manifiestan que “satisface la/las norma/normas...”. Los primeros no necesariamente cumplen, en la práctica, con la o las normas declaradas. Es simplemente una fórmula comercial que crea la apariencia de que el medidor tiene mejores prestaciones que las que realmente puede garantizar, sin comprometer legalmente al fabricante. El cumplimiento de una o más normas debe ser certificado por un organismo competente.



Rion NL-27



Bruel 2260



01 dB Solo



01 dB Symphonie



Cesva SC-30

1.4 Analizadores de espectro

Habíamos visto al principio de este capítulo que no siempre el valor eficaz de una señal sonora (el cual se relaciona con su potencia o energía) es suficiente para describir adecuadamente un ruido con miras a analizar sus causas o sus efectos. Las redes de ponderación (A, C, etc.) constituyen un primer intento para subsanar en forma económica esta falencia, y de hecho permiten obtener resultados útiles y significativos para resolver muchos casos. Existen, no obstante, diversas situaciones en las cuales es necesario disponer de un análisis más detallado de una señal acústica que la que brinda el medidor de nivel sonoro. A continuación se detallan algunas de ellas:

- Quando se desea identificar fuentes de ruido. Muchas fuentes de ruido generan, por su misma naturaleza, tonos de frecuencias definidas. Por ejemplo, los motores, ventiladores, turbinas, cajas de engranajes, etc. producen frecuencias relacionadas con la velocidad de rotación de sus diferentes partes.
- Quando se desea evaluar el resultado esperable al aplicar determinado tratamiento acústico. Los materiales acústicos, tales como paneles absorbentes, aislantes o difusores responden en forma diferente a las diversas frecuencias, por lo cual es necesario conocer la composición espectral del ruido.
- Quando se desea evaluar el efecto de determinados tipos de ruido. Es sabido que a igual energía, los tonos puros son más perjudiciales para el oído que los ruidos de banda más o menos amplia, debido a que la misma energía se encuentra concentrada en una pequeña porción del oído interno. Ante la presencia de tonos puros la red de ponderación A da una valoración poco satisfactoria del potencial dañoso de un ruido.



- d) Cuando se quiere determinar en qué grado se transmite un sonido a través de una estructura. Las estructuras mecánicas o edilicias proporcionan un medio para la propagación por vía sólida del sonido, pero la efectividad de la transmisión varía con la frecuencia.
- e) Cuando se desea seleccionar métodos, materiales y estructuras para resolver determinado problema de ruido. Debido a b), el tipo de material que mejor se adapta para una dada situación depende de dónde se concentra la mayor cantidad de energía sonora, y de cuánto se desea reducir en cada banda.
- f) Cuando se desea aplicar determinados criterios sobre aceptabilidad cualitativa y cuantitativa de un determinado ruido. Hay varios criterios psicoacústicos requieren un conocimiento más o menos detallado de la distribución espectral del ruido. Por ejemplo el nivel de interferencia a la palabra (PSIL) y las curvas NR para evaluación del ruido en un ambiente dado.
- g) Cuando se intenta evaluar la sonoridad evocada por un sonido complejo.
- h) Cuando se requiere ecualizar un sistema de audio para compensar las irregularidades acústicas de la sala y los parlantes o cajas acústicas. Por ejemplo, si existen frecuencias de resonancia o por el contrario frecuencias en las que la absorción es excesiva, se ajustarán las bandas correspondientes de manera de atenuar o resaltar la frecuencia en la cual se produce el defecto, y para ello es necesario conocer la respuesta del sistema electroacústico ante una señal estándar (ruido rosa) con igual valor eficaz en cada banda de octava.

1.5 Filtros de Bandas de frecuencia

Las mediciones requeridas en las situaciones anteriores pueden realizarse mediante un tipo de instrumento denominado **analizador de espectro**. Tiene una estructura similar a la de un medidor de nivel sonoro, en el cual se reemplaza el filtro de ponderación por uno o más **filtros pasabanda**, es decir filtros que permiten pasar las señales comprendidas en una banda relativamente estrecha de frecuencias y rechazan las restantes. Al ser estos filtros muy selectivos en frecuencia permiten un análisis detallado del contenido espectral del ruido.

En general es norma describir el ancho de banda relativo expresado en fracciones de octava, como por ejemplo analizadores de octava, de tercio de octava, etc. Si llamamos α a la fracción de octava de un filtro, entonces para cualquier banda se debe cumplir que

$$f_{s,k} = 2^{\alpha} f_{i,k} .$$

Como además

$$f_{s,k} f_{i,k} = f_{o,k}^2 ,$$

resulta

$$f_{i,k} = 2^{-\alpha/2} f_{o,k}$$

$$f_{s,k} = 2^{\alpha/2} f_{o,k}$$

de donde



$$B = \frac{f_{s,k} - f_{i,k}}{f_{o,k}} = 2^{\alpha/2} - 2^{-\alpha/2}.$$

Por otra parte, la condición de adyacencia entre las bandas contiguas

$$f_{i,k} = f_{s,k-1}$$

implica que

$$f_{o,k} = 2^{\alpha} f_{o,k-1},$$

es decir que la relación entre frecuencias centrales sucesivas es la misma que entre las frecuencias superior e inferior de cada banda.

En la tabla 6.2 se dan los valores de f_s/f_i , y B para varias fracciones de octava α que aparecen habitualmente en los analizadores comerciales.

Las frecuencias centrales para filtros de banda de octava y tercio de octava están normalizadas nacional e internacionalmente (por ejemplo, a través de las normas **IEC 225** (1966) e **IRAM 4061** (1965, 1991)). Para ello se ha tomado el valor de **1000 Hz** como punto de partida, y se han modificado los valores ligeramente de manera de lograr a la vez una escala por décadas, por octavas, y por tercios de octava. Una escala es por décadas cuando dado cualquier valor de dicha escala, también aparece la década superior y la década inferior. Así, dado que partimos de **1000 Hz**, también debería aparecer **10 Hz**, **100 Hz** y **10000 Hz**. Ello es posible dado que **10** octavas equivale a una relación de frecuencias de **1024**, que es casi exactamente **3** décadas.

Tabla 6.2. Parámetros característicos de filtros pasabanda de diversas fracciones de octava.

α	f_s / f_i	B
1	2	0,707
$1/2$	1,414	0,348
$1/3$	1,260	0,232
$1/6$	1,122	0,116
$1/10$	1,072	0,0693
$1/12$	1,059	0,0578
$1/24$	1,029	0,0289



En la tabla 6.3 se incluyen las frecuencias normalizadas correspondientes a las tres décadas del rango audible. Las frecuencias pueden extenderse a otras bandas por encima (ultrasonidos) y por debajo (infrasonidos, vibraciones) multiplicando o dividiendo por 10. Podemos apreciar que las décadas son exactas, así como la mayoría de las “octavas”. Algunas “octavas” son sólo aproximadas. Por ejemplo, 315 no es exactamente el doble de 160, ni 125 el doble de 63, aunque el error es en todos los casos menor de un 2 %.

Tabla 6.3. Frecuencias centrales normalizadas de tercio de octava para utilizar en analizadores de espectro para el rango audible. Las señaladas con un asterisco (*) también son frecuencias centrales de octava.

25	*250	2500
*31,5	315	3150
40	400	*4000
50	*500	5000
*63	630	6300
80	800	*8000
100	*1000	10000
*125	1250	12500
160	1600	* 16000
200	*2000	20000

1.6 Conversión de bandas

En ocasiones es necesario pasar del espectro correspondiente a un tipo de banda al de otro tipo de banda, por ejemplo de tercio de octava a octava. Esta situación se suele dar cuando se desea comparar mediciones realizadas con distintos anchos de banda relativos (distintos porcentajes), o cuando se va a aplicar algún criterio o utilizar ciertas especificaciones que se basan en un tipo de banda pero se han realizado las mediciones con un instrumento apropiado para otro tipo. Para realizar la conversión debe utilizarse la densidad espectral, que es un parámetro invariante ante el tipo de medición.

PASAR DE UNA BANDA MAYOR A UNA MENOR



En este caso (figura 6.4) debemos suponer que la densidad espectral es constante dentro de la banda mayor, lo cual por las razones antes mencionadas probablemente no sea cierto, y entonces el resultado será sólo aproximado.

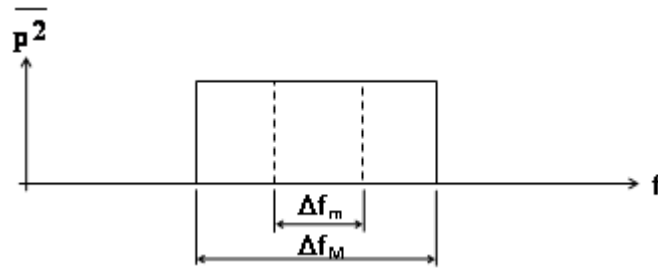


Figura 6.4. Conversión de una banda mayor en una banda menor.

Llamando Δf_M al ancho de banda de la banda mayor y Δf_m al de la banda menor,

$$P_{\Delta f_M}^2 = \overline{p^2(f)} \Delta f_M$$

$$P_{\Delta f_m}^2 = \overline{p^2(f)} \Delta f_m$$

Dividiendo miembro a miembro y pasando a decibeleles, se tiene

$$NPS_{\Delta f_M} - NPS_{\Delta f_m} = 10 \log_{10} \frac{\Delta f_M}{\Delta f_m}.$$

PASAR DE UNA BANDA MENOR A UNA MAYOR

En este caso hay n bandas menores dentro de la banda mayor. Podemos calcular la densidad espectral en las diferentes frecuencias $f_1, \dots, f_k, \dots, f_n$ a partir de la presión sonora eficaz en la banda respectiva,

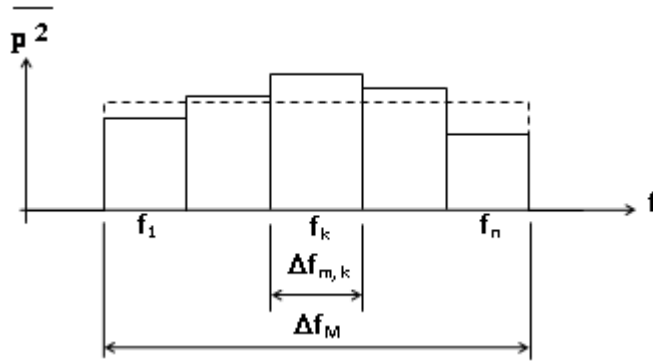


Figura 6.5. Conversión de n bandas menores en una banda mayor.

$$\overline{p^2}(f_k) = \frac{P_{f_k \text{ ef}}^2}{\Delta f_{m,k}} = \frac{P_{\text{ref}}^2 10^{\frac{\text{NPS}_k}{10}}}{\Delta f_{m,k}}$$

y luego determinar la presión sonora eficaz total en la banda mayor realizando la correspondiente integración, calculada en este caso como la suma de tres términos:

$$P_{\text{ef}}^2 = \sum_{k=1}^n \frac{P_{\text{ref}}^2 10^{\frac{\text{NPS}_k}{10}}}{\Delta f_{m,k}} \Delta f_{m,k} = P_{\text{ref}}^2 \sum_{k=1}^n 10^{\frac{\text{NPS}_k}{10}}$$

de donde

$$\text{NPS} = 10 \log_{10} \left(\sum_{k=1}^n 10^{\frac{\text{NPS}_k}{10}} \right).$$

CONVERSIÓN DE ESPECTRO DE BANDAS A NIVEL SONORO

Si se ha medido un espectro de bandas es posible estimar el nivel sonoro con una ponderación determinada (por ejemplo, la **A**), correspondiente a la misma velocidad de respuesta. Para ello se corrige el valor en cada banda a través de la curva de compensación, ya que esta curva actúa como un filtro con una respuesta en frecuencia determinada. Para el caso de la ponderación **A**, si llamamos **A(f)** a su respuesta frecuencial, dada para varias frecuencias en la columna correspondiente de la Tabla 6.1, resulta



$$NS = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{NPS(f_i) + A(f_i)}{10}} \right).$$

La sumatoria representa la superposición en energía (es decir en presión eficaz al cuadrado) previamente corregida por la curva **A**. Si se elimina la ponderación, en lugar del *nivel sonoro* se obtiene el *nivel de presión sonora*.

1.7 Instrumentos integradores y estadísticos

Los instrumentos vistos anteriormente brindan resultados puntuales, por ejemplo, el nivel sonoro en un determinado instante de tiempo. En muchas situaciones es necesario, en cambio, obtener una medida global del ruido durante un intervalo de tiempo considerable. El ejemplo más común es la determinación del nivel de exposición al ruido de un operario en su ambiente laboral. Otro ejemplo es la obtención de parámetros estadísticos del ruido comunitario. En estos casos se requieren **instrumentos integradores**, (Norma **IEC 804**, 1985), capaces de obtener la energía acumulada o **instrumentos estadísticos**, que determinan diversos tipos de promedios.

Entre los instrumentos integradores se encuentran los **dosímetros**, cuya finalidad es determinar la dosis porcentual recibida por un trabajador con respecto al máximo nivel sonoro continuo equivalente. Dentro de los instrumentos estadísticos están los **clasificadores estadísticos**, destinados a la obtención de la distribución estadística a lo largo del tiempo de los diversos niveles sonoros.

1.8 Calibradores

Los instrumentos de medición acústica requieren ser calibrados periódicamente debido a que la sensibilidad de los micrófonos va variando a lo largo del tiempo. En los micrófonos electret, por ejemplo, se producen lentas fluctuaciones en la carga total acumulada en las placas, lo cual modifica la sensibilidad. Por otra parte, pequeñas variaciones en la fuerza tensora del diafragma, así como las variaciones climáticas o ambientales de la presión, temperatura y humedad provocan también variaciones de sensibilidad. Por último, la deposición de polvillo o partículas de humo en el delicado y ligero diafragma puede alterar su masa u otras propiedades y por lo tanto su respuesta.

El proceso de calibración de un instrumento cualquiera consiste en ajustar ligeramente la ganancia de su amplificador de entrada de modo de compensar las variaciones de sensibilidad mencionadas. Dicho ajuste se realiza actuando sobre un potenciómetro, accesible desde afuera del equipo con un pequeño destornillador.

También se habla de la **calibración de un micrófono**. En este caso no nos referimos a ningún ajuste, ya que los micrófonos carecen de parámetros ajustables por el usuario, sino a la determinación precisa de la sensibilidad *real* (en contraposición con la *nominal*). Los micrófonos pueden calibrarse por diversos métodos, que pueden clasificarse en dos tipos: calibración por reciprocidad y por aplicación de un campo sonoro de nivel de presión sonora conocida. Los métodos recíprocos se utilizan en el laboratorio para



realizar calibraciones primarias³ de gran precisión, pero por la secuencia de operaciones requeridas no son aptos para calibraciones in situ.

En cuanto a las calibraciones por medio de campos sonoros conocidos, se apela en general a fuentes acústicas en las cuales existan relaciones físicas sencillas y conocidas que permitan determinar en forma directa el campo sonoro, o bien a generadores cuya estabilidad frente a las condiciones ambientales o al simple transcurso del tiempo sea suficientemente alta como para garantizar un campo constante (calibrados previamente en el laboratorio para garantizar su valor).

Entre los primeros se encuentra el pistófono, basado en la compresión adiabática generada por la oscilación de un pequeño pistón en un receptáculo cerrado, que a modo de ejemplo se analiza en la sección siguiente. Entre los generadores estables tenemos los accionados por un cristal piezoeléctrico, el cual al ser excitado con una tensión oscilatoria, produce deformaciones mecánicas también oscilatorias, las cuales se acoplan a un diafragma que radia sonido.



Cesva CB-5



Rion NC-74

1.9 Fuente sonora omnidireccional

Para la mayoría de las mediciones acústicas en edificios, la fuente sonora debe irradiar el sonido de manera equitativa en todas las direcciones para ofrecer resultados fiables. Para cumplir con los estándares relevantes en mediciones acústicas, se requiere el uso de una fuente sonora omnidireccional. Una fuente sonora omni-direccional (FSO) es un dispositivo que radia sonido en todas direcciones, en una gama amplia de frecuencias.

La fuente omnidireccional suele estar formada por 12 altavoces, distribuidos en un dodecaedro que distribuye el sonido como si fuera una esfera. Los doce altavoces están conectados de manera serie/paralelo, que asegura la operación en la misma fase.

³ Una calibración primaria es aquella que permite obtener un patrón contra el cual contrastar otros micrófonos



Además de la fuente será necesario contar con los siguientes equipos para alimentarla:

Amplificador.

Generador de ruido Rosa/Blanco (integrado o externo)



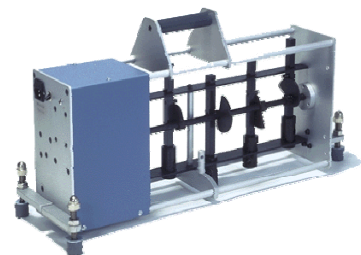
Caja transporte



1.10 Máquina de impactos

Una máquina de impactos normalizada (ISO 140) está diseñada para generar un ruido de impactos normalizado para la medición en laboratorio e in situ del aislamiento acústico de suelos al ruido de impactos. Debe disponer de 5 martillos alineados. Cada uno de ellos tiene un peso de 500 g y cae libremente de una distancia de 40 mm, con un área de impacto de 7 cm² y una frecuencia de martilleo de 10 golpes por segundo, lo que equivale a 2 veces por segundo cada martillo. El tiempo medio entre impactos es de 100 ms. La unidad se debe apoyar en pies de goma ajustables para aislarla de las vibraciones.

La máquina de impactos debe tener una protección contra sobrecalentamiento para evitar posibles daños en la unidad debidos a un funcionamiento anormal del equipo: bloqueo, sobrecarga o sobreesfuerzo.



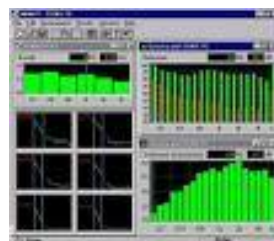
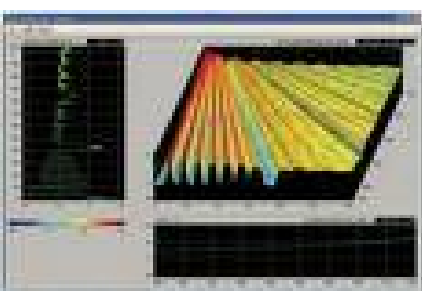
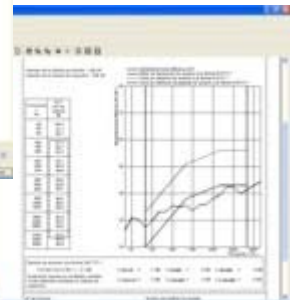
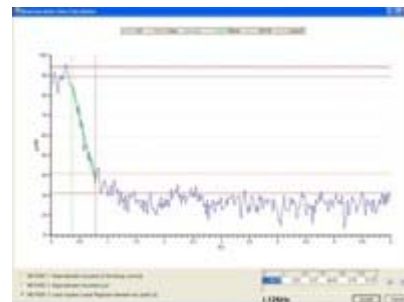
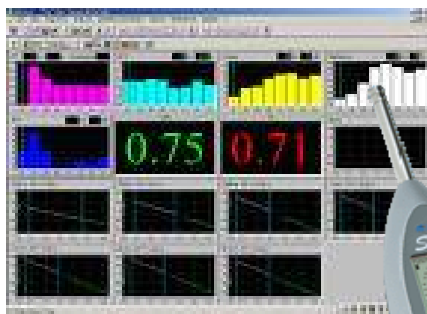
1.11 Software

Como complemento, los equipos actuales suelen ofrecer paquetes de software que permite descargar y obtener en tiempo real todos los datos medidos por el equipo, además, ofrecen la posibilidad de visualizar esos datos en formato gráfico y numérico y crear informes. Existe además software específico para cálculos acústicos.



Grado en ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Acústica Arquitectónica



1.12 Otros

Además de los elementos principales utilizados para las mediciones acústicas, existen otros equipos adicionales que ayudan en la realización de estas, como son:

- Pantalla antiviento



- Estación meteorológica.
- Velocidad viento.
- Humedad.
- Temperatura.
- Maleta de transporte.
- Difusores.
- Sistemas inalámbricos para comunicación de fuente y sonómetro.
- Cables varios.
- Soportes de micro.
- Medidor de distancias.

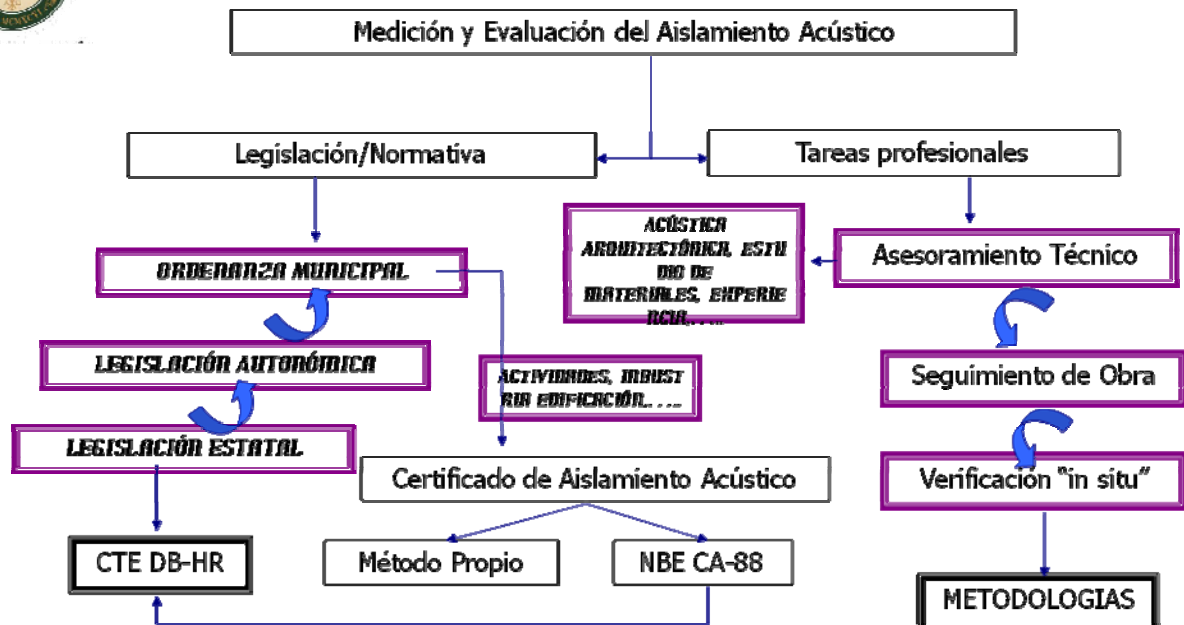




2. MEDICIONES ACÚSTICAS

2.1 Introducción

Dentro del campo de las mediciones acústicas, es necesario realizar una clasificación con el objeto de diferenciar los aspectos fundamentales. Inicialmente, la medición y evaluación del aislamiento acústico puede ser realizada bajo una legislación/normativa concreta o como una tarea profesional de trabajo, como se puede observar en el diagrama siguiente. En esta sección se describen los conceptos comunes a todo tipo de mediciones acústicas.



Cuando no es necesaria mucha precisión o no existe legislación se suele aplicar una metodología propia consistente en un procedimiento básico. Sin embargo, cuando es necesario seguir una metodología normalizada aparecen procedimientos avanzados. El uso de uno u otro procedimiento depende del nivel de exigencia requerido.

- La legislación determina las exigencias para:
- Características del equipo
- Características del campo sonoro
- Características del ensayo
- Procedimiento establecido
- Sistema de calidad ISO
- Parámetro de evaluación
- Expresión de los resultados
- Términos de adaptación espectral

En España la Agencia Nacional de Acreditación (ENAC www.enac.es) emite acreditaciones para mediciones acústicas bajo las normas UNE-EN ISO. Esta acreditación requiere una inspección periódica. ISO es la Organización Internacional de Normalización que se encarga de la redacción, revisión y publicación de normativas internacionales. En Europa contamos con el Comité Europeo de Normalización (CEN). Finalmente, en España la Agencia Española de Normalización (AENOR) es la encargada de traducir y proponer las normas internacionales y europeas a nuestro país.

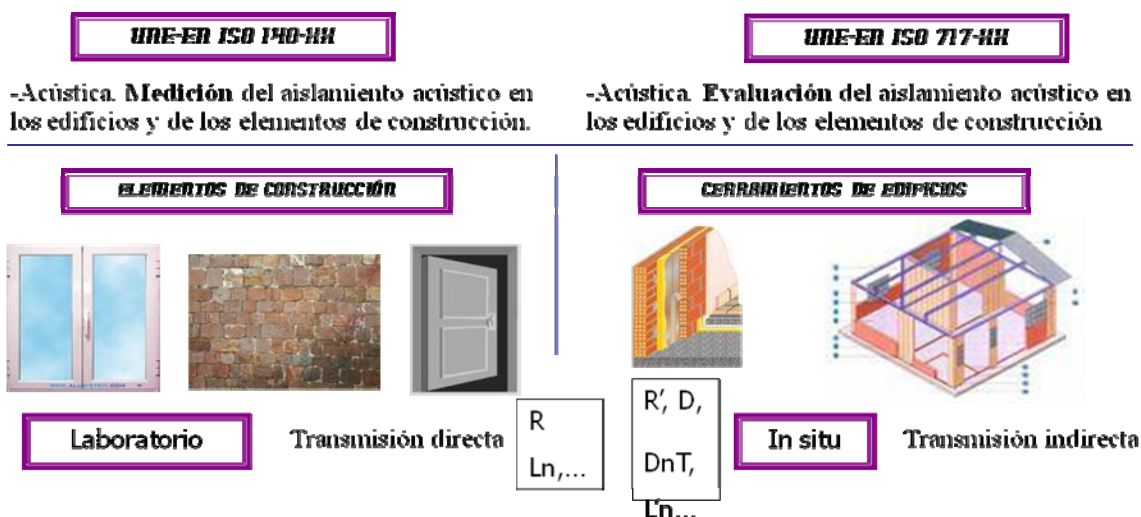
Según expresa el CTE en su apartado 2 de la sección 5.3 **Control de la obra terminada**:

“En el caso de que se realicen **mediciones in situ** para comprobar las exigencias de aislamiento acústico a ruido aéreo, de aislamiento acústico a ruido de impactos y de limitación del tiempo de reverberación, se realizarán por laboratorios acreditados y conforme a lo establecido en las **UNE-EN ISO**



140-4 y UNE-EN ISO 140-5 para ruido aéreo, en la UNE-EN ISO 140-7 para ruido de impactos y en la UNE-EN ISO 3382 para tiempo de reverberación. La valoración global de resultados de las mediciones de aislamiento se realizará conforme a las definiciones de diferencia de niveles estandarizada para cada tipo de ruido según lo establecido en el Anejo H.”

Una vez obtenidas las mediciones in situ por frecuencias, es necesario obtener un valor global que permita la comparación con las exigencias del DB-HR. Para la **evaluación** del aislamiento acústico se utilizará las UNE-EN ISO 717-1 y UNE-EN ISO 717-2.



En la documentación técnica adicional se describen las partes más importantes del protocolo de medidas necesario para las diferentes normas UNE-EN ISO necesarias para la certificación DB-HR. En las transparencias se resumen las claves del procedimiento de medida y evaluación, mostrando fotografías, gráficas y ejemplificaciones. Su lectura es recomendada y servirá de apoyo para la realización del caso práctico semanal. En el libro publicado por AENOR, “Acústica en la edificación”, se incluyen las normas completas, además de otras importantes dentro de la acústica en la edificación.





En concreto, las normas referenciadas en el DB-HR y que vamos a manejar a lo largo de esta unidad didáctica son:

UNE-EN ISO 140-4:1999 Acústica. 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. (ISO 140-4:1998).

UNE-EN ISO 140-5:1999 Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 5: Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y de fachadas. (ISO 140-5:1998).

UNE-EN ISO 140-7:1999 Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 7: Medición in situ del aislamiento acústico de suelos al ruido de impactos. (ISO 140-7:1998)

UNE-EN ISO 717-1:1997 Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo. (ISO 717-1:1996).

UNE-EN ISO 717-2:1997 Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos. (ISO 717-2:1996).

La instrumentación mínima requerida para cada tipo de ensayo es:

Aislamiento a Ruido Aéreo entre recintos (140-4).

- Trípode
- Calibrador sonoro (clase 1)
- Sonómetro integrador promediador con análisis en bandas de tercio de octava (clase 1)
- Módulo de cálculo de tiempo de reverberación.
- Fuente sonora omnidireccional
- Generador de ruido

Aislamiento a Ruido Aéreo de fachadas (140-5).

- Trípode
- Calibrador sonoro (clase 1)
- Sonómetro integrador promediador con análisis en bandas de tercio de octava (clase 1)
- Módulo de cálculo de tiempo de reverberación.
- Fuente sonora omnidireccional
- Generador de ruido
- Estación meteorológica
- Bola antiviento

Aislamiento a Ruido de impacto (140-7).

- Trípode
- Calibrador sonoro (clase 1)
- Sonómetro integrador promediador con análisis en bandas de tercio de octava (clase 1)
- Módulo de cálculo de tiempo de reverberación.



- Máquina de impactos

Estos equipos deben cumplir las siguientes normativas específicas:

- CEI 60651:1979, Sonómetros
- CEI 60804:1985, Sonómetros integradores-promediadores.
- CEI 60942:1988, Calibradores acústicos.
- CEI 61260:1995, Filtros de banda de octava y filtros de banda de una fracción de octava.
- Anexo A- UNE-EN ISO 140-7:199 – Máquina de impactos.
- UNE-EN ISO 140-4/5: Características de la fuente sonora.

Además, como todo equipo de medición requieren de unos procesos de metrología legal:

- Inscripción en el Registro de Control Metrológico. Fabricante
- Aprobación de modelo. Fabricantes solicita a Administración Pública.
- La verificación Primitiva. Fabricante solicita laboratorios de verificación metro lógica oficialmente autorizados.
- La verificación periódica. Responsabilidad exclusiva del usuario del instrumento.
- Verificación después de la reparación o modificación. Laboratorio autorizado.

2.2 Generalidades

El sonido puede ser descrito por medio de la presión sonora $p(t)$, es decir, la presión incremental. Esta es una función del tiempo y habitualmente interesa su valor eficaz P_{ef} , definido como

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} ,$$

debido a que P_{ef} está relacionado con la energía de la onda sonora a través de la ecuación de la intensidad media:

$$I = \frac{P_{ef}^2}{\rho_0 c} .$$

El valor eficaz P_{ef} es, entonces, un valor constante que produce durante el tiempo T la misma energía por unidad de superficie que la onda sonora real que varía en el tiempo.



Por sí sola, la presión eficaz no proporciona demasiada información sobre el fenómeno sonoro que se desea evaluar, ya que no tiene en cuenta dos aspectos fundamentales: el **espectro de frecuencias** y el **tiempo**. Así, dos tonos puros de **200 Hz** y **2000 Hz** y valor eficaz de **1 Pa** (correspondiente a un nivel de presión sonora de **94 dB**) tienen efectos muy diferentes sobre el oído humano. El de **200 Hz**, aunque tal vez algo molesto, resulta inocuo, y en cambio el de **2000 Hz** es sumamente pernicioso. Análogamente, si se toma un tiempo de promediación de **1 s**, dos pulsos como los de la figura 6.5 tienen igual presión eficaz, y sin embargo el más corto es más perjudicial.

Para una evaluación más completa de un fenómeno sonoro, es necesario contemplar ambos aspectos: **frecuencia y tiempo**. El aspecto de la **frecuencia** puede ser tenido en cuenta intercalando diversos tipos de filtros entre la señal sonora detectada primariamente por el micrófono y el indicador final del instrumento de medición. Dichos filtros encuadran normalmente en dos grandes clases:

- a) Filtros de banda (de octava, de tercio de octava, de ancho de banda fijo, etc.).
- b) Redes de compensación (A, C, etc.).

El aspecto temporal, por su parte, se tiene en cuenta por medio del tipo de respuesta temporal del instrumento:

- a) Velocidad dinámica de respuesta (lenta, rápida, impulsiva)
- b) Función promediadora (valor eficaz, pico, dosis, descriptores estadísticos)

Otra cuestión que en algunos casos es importante es el tipo de incidencia, es decir, la dirección de procedencia del sonido. En este sentido, es común en ambientes laborales una diferencia a veces marcada en el deterioro auditivo de uno y otro oído de algunos operarios, lo cual puede deberse a que el sonido proviene de un lado, perjudicando entonces más al oído correspondiente. Para poner de manifiesto esto es importante la selección del micrófono, no sólo en lo relativo a su respuesta frecuencial sino también en sus características direccionales.

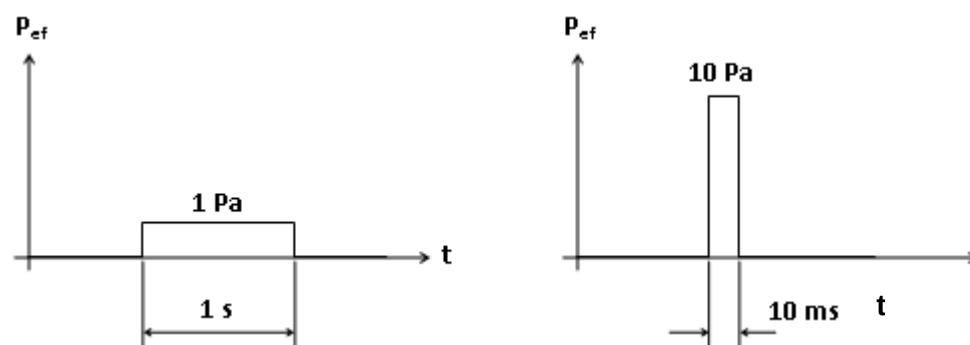


Figura 6.5. Dos pulsos de igual valor eficaz pero diferentes duraciones. El más corto es mucho más intenso (**114 dB**), y además tiene mayor contenido en alta frecuencia, por lo cual es más perjudicial para el oído



2.3 Redes de ponderación de frecuencia

Cuando tras los trabajos de Fletcher y Munson se comprobó que la percepción de la sonoridad era un fenómeno más complejo que lo que se creía hasta entonces (ya que, por ejemplo, la sensibilidad del oído dependía fuertemente de la frecuencia), se intentó crear un instrumento de medición capaz de reflejar con una única cifra la sensación de sonoridad producida por un sonido cualquiera. Para lograr eso se propuso intercalar un filtro de ponderación de frecuencias con una curva de respuesta en frecuencia inversa de las curvas de

Fletcher y Munson. Así, como para las bajas frecuencias las curvas de Fletcher y Munson suben (dado que el oído requiere mayor nivel de presión sonora por su menor sensibilidad), este filtro debía atenuar las componentes de baja frecuencia. Por ejemplo, si a **200 Hz** una curva de Fletcher y Munson sube **20 dB** por encima del valor correspondiente a **1 kHz**, el filtro a intercalar debía atenuar en **20 dB** el valor de nivel de presión sonora medido a esa frecuencia. El filtro que se proponía intercalar debía, entonces, imitar la respuesta del oído humano, acentuando las frecuencias en las que el oído es más sensible y atenuando aquellas en que es menos sensible.

Esta idea tropezó con varias dificultades. En primer lugar, no hay una sola curva de Fletcher y Munson, sino que para cada nivel de sonoridad hay una diferente, resultando que para una misma frecuencia se requerirían diversas atenuaciones según el nivel de la señal. Esto llevó a que se propusieran *tres* curvas de ponderación diferentes: la curva **A**, válida para niveles de sonoridad próximos a los **40 fon** (nivel de sonoridad igual al de un tono senoidal de **1 kHz** y **40 dB** de nivel de presión sonora), la curva **B**, válida para niveles de sonoridad del orden de **70 fon**, y la curva **C**, destinada a los niveles de sonoridad cercanos a **100 fon**.⁴ En la figura 6.6 se muestran las tres curvas de ponderación.

La segunda dificultad, más seria que la anterior, fue que las curvas de igual nivel de sonoridad de Fletcher y Munson sólo son válidas para tonos senoidales, por lo cual el propósito original de obtener un valor único que se correlacionara con la sensación de sonoridad no pudo cumplirse. En efecto, dos sonidos de igual nivel con ponderación **A**, por ejemplo, pero de diferente composición espectral, podían resultar de sonoridad subjetiva muy desigual⁵.

A pesar de ello, investigaciones posteriores revelaron que las cifras medidas intercalando la curva de ponderación **A** estaban muy bien correlacionadas con el daño auditivo experimentado por las personas expuestas a ruidos intensos durante periodos considerables de tiempo, como suele ocurrir en los ambientes de trabajo en la industria. También se correlacionaba bastante bien con la sensación de molestia y con la interferencia a la palabra causadas por determinados ruidos. Por estos motivos no sólo se popularizó dicha curva, sino que además fue adoptada en numerosas normas y legislaciones, según ya se ha visto. En la tabla 6.7 se dan los valores de la curva **A** para diversas frecuencias.

⁴ Las curvas **A**, **B** y **C** en realidad son *aproximaciones* de las inversas de las curvas de Fletcher y Munson de **40**, **70** y **100 fon**, ya que además se pretendía que fueran realizables con redes eléctricas sencillas.

⁵ La manera de medir la sensación de sonoridad es a través del concepto de **sonoridad** que se determina por métodos como el ya descrito Mark VI.

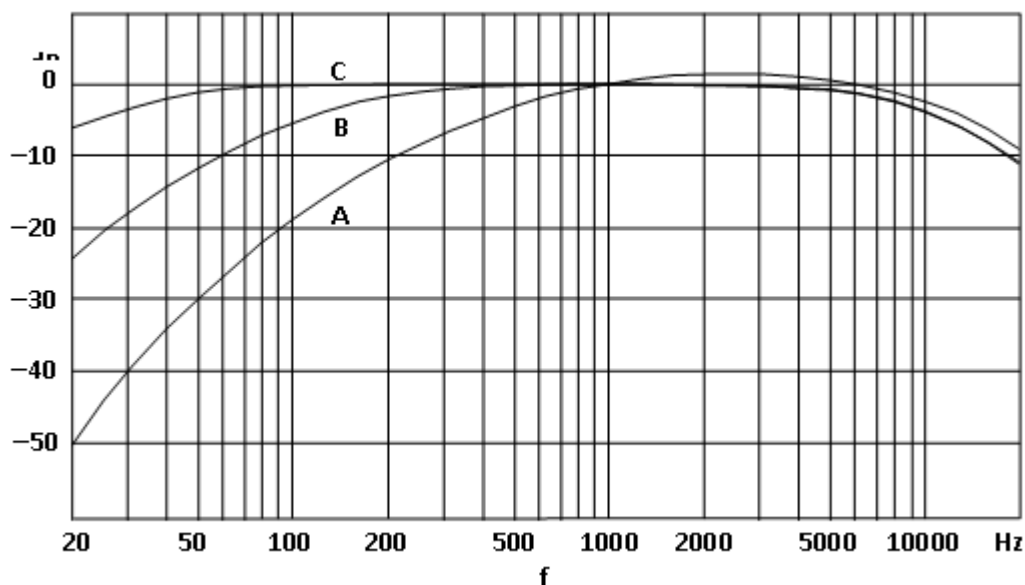


Figura 6.6. Curvas de compensación (o ponderación) **A**, **B**, y **C**. Para cada frecuencia, el valor de la ordenada representa la corrección aditiva a aplicar al **nivel de presión sonora** de un tono de esa frecuencia para obtener su **nivel sonoro**. En **1 kHz** las tres curvas coinciden en **0 dB**.

Los valores medidos con estas curvas de compensación intercaladas se denominan respectivamente **nivel sonoro A**, **nivel sonoro B** y **nivel sonoro C**, y se expresan en **dBA**, **dBB** y **dBC** (también abreviados **dB(A)**, **dB(B)** y **dB(C)**). La curva **B** en realidad prácticamente no se utiliza hoy en día, por lo cual es raro que los instrumentos la incluyan. La curva **C**, en cambio, viene incorporada a la mayoría de los instrumentos, ya que algunas especificaciones requieren la lectura en **dBC**.

Tabla 6.7. Valores de las correcciones de las curvas de ponderación **A**, **B** y **C** para la serie de frecuencias estándar de octavas.

Frecuencia [Hz]	Curva A [dB]	Curva B [dB]	Curva C [dB]
10	-70,4	-38,2	-14,3
12,5	-63,4	-33,2	-11,2
16	-56,7	-28,5	-8,5
20	-50,5	-24,2	-6,2
25	-44,7	-20,4	-4,4
31,5	-39,4	-17,1	-3,0



Acústica Arquitectónica

40	-34,6	-14,2	-2,0
50	-30,2	-11,6	-1,3
63	-26,2	-9,3	-0,8
80	-22,5	-7,4	-0,5
100	-19,1	-5,6	-0,3
125	-16,1	-4,2	-0,2
160	-13,4	-3,0	-0,1
200	-10,9	-2,0	0,0
250	-8,6	-1,3	0,0
315	-6,6	-0,8	0,0
400	-4,8	-0,5	0,0
500	-3,2	-0,3	0,0
630	-1,9	-0,1	0,0
800	-0,8	-0,0	0,0
1000	0,0	0,0	0,0
1250	0,6	-0,0	0,0
1600	1,0	-0,0	-0,1
2000	1,2	-0,1	-0,2
2500	1,3	-0,2	-0,3
3150	1,2	-0,4	-0,5
4000	1,0	-0,7	-0,8
5000	0,5	-1,2	-1,3
6300	-0,1	-1,9	-2,0
8000	-1,1	-2,9	-3,0
10000	-2,5	-4,3	-4,4
12500	-4,3	-6,1	-6,2
16000	-6,6	-8,4	-8,5
20000	-9,3	-11,1	-11,2

Por otra parte, dicha medición permite, por comparación con el nivel sonoro **A**, determinar si existen o no componentes de baja frecuencia importantes. En efecto, dado que la curva **A** atenúa las bajas frecuencias y la curva **C** no, si las lecturas en **dBA** y **dBC** son similares, es porque el contenido de baja



frecuencia no es importante. Si, en cambio, la lectura en **dB**C es mayor que la lectura en **dB**A, es porque hay presente bastante energía de baja frecuencia.

En algunos instrumentos se incluye una **respuesta plana**, sin compensación, que es útil, entre otras cosas, para obtener la potencia sonora total de una fuente. Si la fuente es esférica, por ejemplo,

$$P_{\text{ot}} = \frac{P_0^2}{\rho_0 c} 4\pi r_0^2 .$$

Además de las curvas de compensación descritas, hay otras varias curvas propuestas y en uso, que son aplicables en situaciones específicas. Por ejemplo, existen varias curvas **D** (según diversos autores) para evaluar la percepción de la ruidosidad, también aplicables al ruido de aviones, y una curva **SI** (speech interference) para medir la interferencia a la palabra. Algunos instrumentos proveen la posibilidad de utilizar curvas programadas por el usuario.

2.4 Respuesta temporal

En la definición de valor eficaz dada al principio interviene un tiempo de integración **T** de cuyo valor depende el resultado. En la figura 6.8 se muestra el valor eficaz de un pulso de **0,1 s** de duración, donde se puede apreciar esta dependencia. Para una onda periódica, al aumentar el tiempo de integración el valor eficaz se aproxima a un valor límite que equivale a integrar durante un periodo. Por ejemplo, para una onda senoidal, dicho valor es $\sqrt{1/2}$ veces su amplitud,⁶ como se aprecia en la figura 6.9. Para el caso más habitual de señales no periódicas, como el ruido, la música o la palabra, se observa en general un fenómeno similar, es decir que a medida que aumenta el tiempo de integración **T** el valor eficaz va tendiendo a una constante (figura 6.10).

⁶ En efecto, aplicando a $p(t) = P \sin \omega t$ la definición de valor eficaz en un tiempo **T**, resulta

$$P_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2 \sin^2 \omega t \, dt} = \sqrt{\frac{1}{2}} P \sqrt{1 - \frac{\sin 2\omega T}{2\omega T}} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{2}} P \quad \text{si } T \rightarrow \infty$$

Si **T** coincide con un número entero de periodos, **P_{ef}** toma un valor igual a su valor límite.

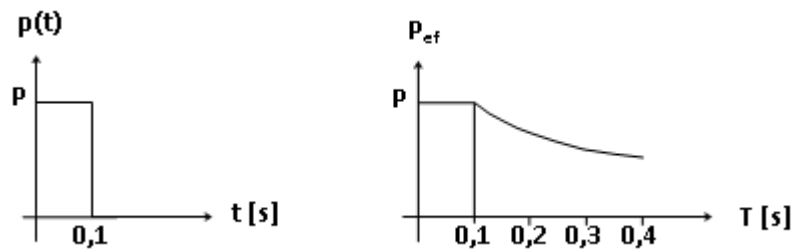


Figura 6.8. Un pulso de **0,1 s** de duración y su valor eficaz en función del tiempo de integración.

En conclusión, cuanto mayor sea el tiempo de integración, menos sensible es el valor eficaz a las fluctuaciones propias del ruido o sonido, transformándose en un parámetro global más que instantáneo del sonido. Esto lleva a considerar la necesidad de establecer al menos dos tipos de respuesta, en función del tipo de fenómeno que se quiera evidenciar con la medición. Surgen así las denominadas **respuesta rápida** y **respuesta lenta**, cuya caracterización precisa veremos luego.

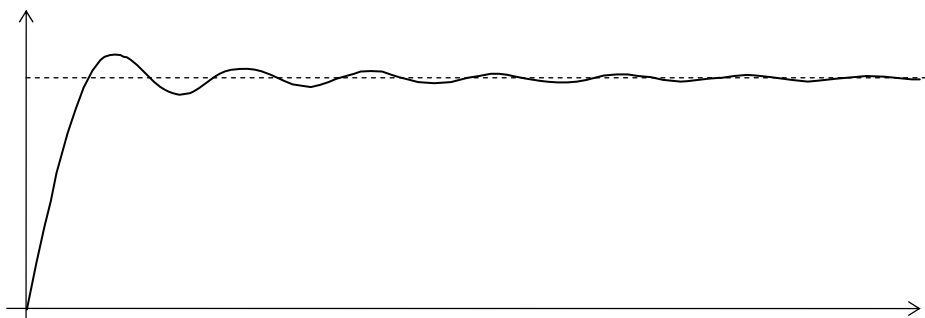


Figura 6.9. Valor eficaz de una onda senoidal en función del tiempo de integración **T**.

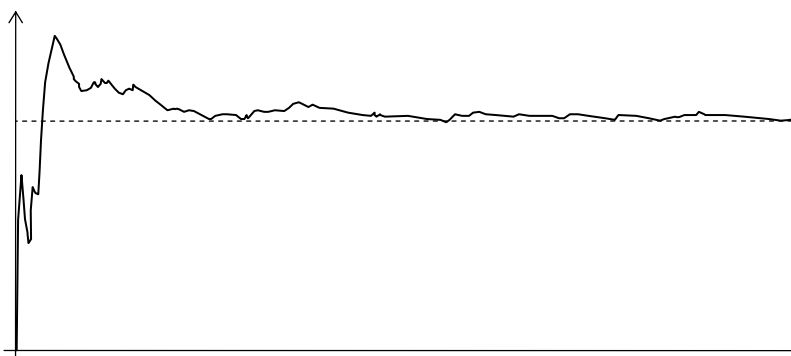


Figura 6.10. Valor eficaz de una señal no periódica en función del tiempo de integración **T**.

La obtención del valor eficaz en forma exacta se podría realizar con un dispositivo que realizara la elevación al cuadrado y la integración, de acuerdo al diagrama de bloques ilustrado en la figura 6.11. Sin embargo, dado que es complicado realizar la integración de la definición en forma exacta, lo que se hace en la práctica es reemplazar dicha integración por un filtro de tipo pasabajos, que cumple una función similar comportándose como una especie de promediador local. Dicha disposición se muestra en el diagrama de bloques de la figura 6.12.

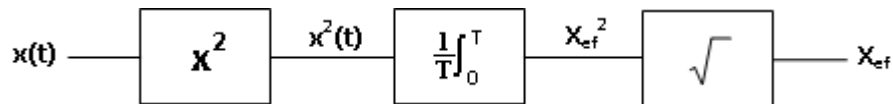


Figura 6.11. Diagrama de bloques correspondiente a un extractor de valor eficaz.

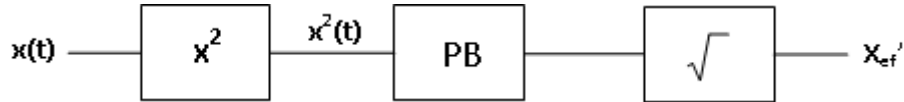


Figura 6.12. Diagrama de bloques de un extractor de valor eficaz en el cual se ha sustituido la integración por un filtro pasabajos.

RESPUESTA LENTA

Se define la **respuesta lenta** como aquella para la cual ante una excitación en forma de pulso senoidal de **1 kHz** y una duración de **0,5 s**, la indicación máxima obtenida está **4 dB** por debajo de la que se obtendría para una señal senoidal de igual frecuencia y amplitud en régimen permanente. Esta situación se ilustra en la figura 6.13.

Resulta, por consiguiente, que la constante de tiempo del filtro para la denominada **respuesta lenta** es de aproximadamente **1 s**.

RESPUESTA RAPIDA

La respuesta rápida se define como aquella para la cual ante una excitación en forma de pulso senoidal de **1 kHz** y una duración de **0,2 s**, la indicación máxima obtenida está **1 dB** por debajo de la que se obtendría para una señal senoidal de igual frecuencia y amplitud en régimen permanente.

$$\tau_{\text{rápida}} \cong 0,125 \text{ s} ,$$

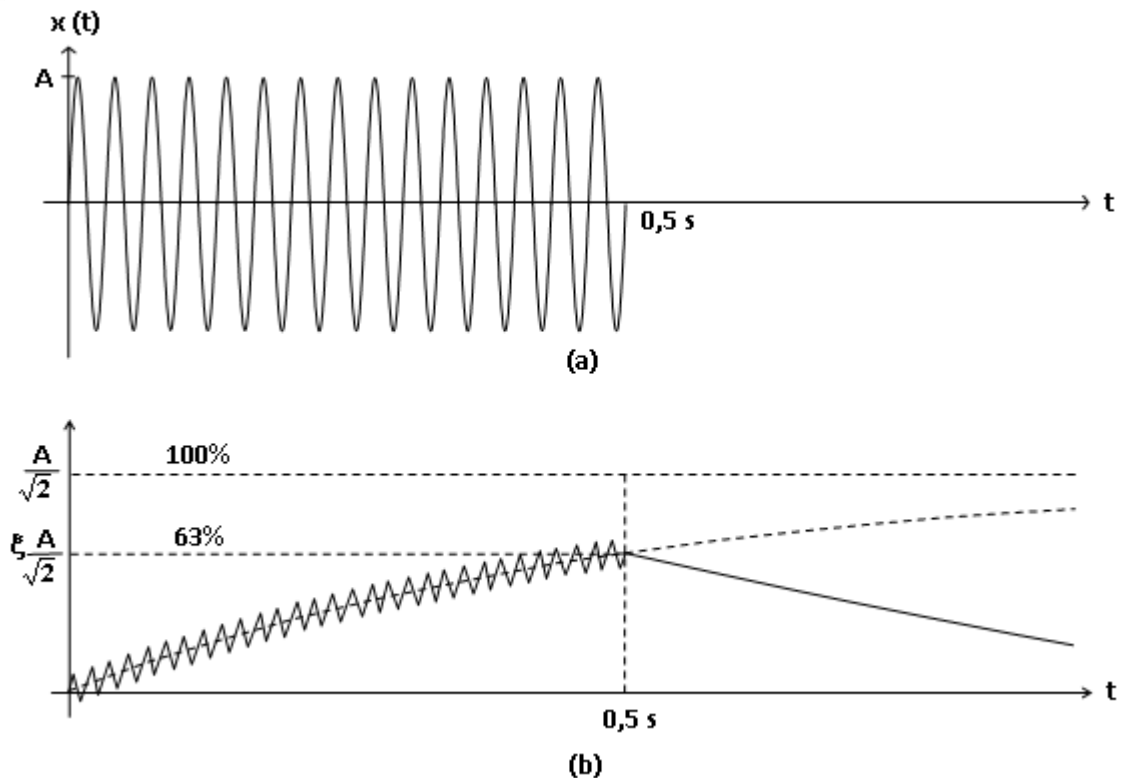


Figura 6.13. Respuesta lenta. **(a)** Un pulso senoidal de frecuencia **1 kHz** y duración **0,5 s** (por claridad de la ilustración la frecuencia realmente representada es de **30 Hz**). **(b)** Salida del extractor de raíz cuadrada. El valor máximo alcanzado debe ser **4 dB** menor que el hipotético valor final, es decir, debe ser un **63%** de dicho valor (por claridad se ha exagerado la amplitud del rizado).

RESPUESTA IMPULSIVA

La respuesta impulsiva es aquella para la cual la constante de tiempo para señales de valor absoluto creciente en el tiempo es de **35 m**, y en cambio para señales de valor absoluto decreciente es de **1,5 s**, es decir

$$\tau_{\text{impulsiva} \uparrow} = 35 \text{ ms} ,$$

$$\tau_{\text{impulsiva} \downarrow} = 1,5 \text{ s} .$$

La diferencia se debe a que de esta manera el instrumento es capaz de reaccionar ante pulsos muy rápidos, como ruidos percusivos o de impacto, explosiones, etc., pero luego retiene el valor leído durante un tiempo razonable que permite su lectura por parte del operador.

2.5 Documento de Certificación acústica.



En la documentación técnica adicional de esta unidad didáctica podéis encontrar un ejemplo basado en datos reales de una Certificación acústica final de obra para la obtención de la licencia de primera ocupación. Los equipos y la metodología seguida es la expuesta a lo largo de esta unidad. Se recomienda su revisión y lectura ya que puede servir de ayuda para la resolución el caso práctico semanal.

3. DEFINICIONES DE PARÁMETROS

Existen varios tipos de parámetros utilizados tanto en las legislaciones como en diversas recomendaciones y criterios de evaluación del ruido, según se detalla a continuación.

NIVEL SONORO CONTINUO EQUIVALENTE (NSCE, L_{eq})

El Nivel Sonoro Continuo equivalente, abreviado **NSCE** y L_{eq} en la Comunidad Económica Europea y en América del Norte, definido por medio de la siguiente ecuación:

$$NSCE = 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p_A^2(t) dt}{p_{ref}^2},$$

donde $p_A(t)$ es la presión sonora ponderada por la red de compensación **A**, p_{ref} es la presión de referencia (**20 μ Pa**), y **T** el tiempo durante el cual se realiza el estudio, que puede ser la duración de una jornada de trabajo, o bien una semana, en caso de que las tareas o actividades varíen fundamentalmente de un día a otro.

DOSIS PORCENTUAL DE RUIDO (D)

Este parámetro mide el porcentaje de “ruido acumulado” en una jornada laboral relativo al máximo “ruido acumulado” admisible. El concepto específico de “ruido acumulado” depende de la reglamentación a aplicar. Existen básicamente dos tipos de reglamentaciones: la adoptada en los países miembros de la Comunidad Económica Europea, en Argentina (decreto **Nº 351/79**), en Australia, etc., y la adoptada en Estados Unidos (**OSHA**), Canadá, etc.

En el primer caso (por ejemplo la reglamentación española) la **dosis porcentual de ruido** se define como

$$D = \frac{\int_0^T p_A^2(t) dt}{10^9 \cdot p_{ref}^2 \cdot T} \cdot 100\%,$$

donde $p_A(t)$ es la presión sonora ponderada por la red **A** y **T** es la duración de una jornada laboral (en general **8 horas**). Dado que la presión elevada al cuadrado es proporcional a la potencia (energía por unidad de tiempo), para este tipo de legislación *la dosis expresa la energía sonora acumulada como porcentaje de la máxima admisible* (que en este caso corresponde a un nivel sonoro de **90 dB** durante **8 horas**).

En cualquier caso la legislación establece que la máxima dosis aceptable es del **100 %**, que corresponde al máximo “ruido acumulado” admisible. La dosis porcentual de ruido se mide con **dosímetros**, cuya escala permite en general medir dosis entre el **1 %** y el **10000 %**. En la legislación española, por ejemplo, una dosis del **10000 %** implicaría una energía acumulada **100** veces mayor que la máxima admisible (correspondería a una exposición permanente a **110 dBA** durante **8 hs**).

NIVEL DE EXPOSICIÓN SONORA (SEL)



Este parámetro se aplica a eventos sonoros discretos o de corta duración, como por ejemplo impactos, explosiones, descargas de gas, etc. Se define como un nivel constante durante un tiempo de referencia de **1 s** que posee la misma energía total que el evento. Es una especie de nivel sonoro continuo equivalente con un tiempo de promediación de **1 s** en lugar de **8 hs**. Es útil cuando se describen ruidos ambientales formados por una cierta cantidad de eventos cortos y no superpuestos, como por ejemplo el ruido de los aviones en las inmediaciones de un aeropuerto, o en la vecindad de un polígono de tiro.

PARAMETROS ESTADISTICOS (L_n , L_{max} , L_{min})

Se define L_n como el valor de nivel sonoro que es superado un **n %** del tiempo. Cuanto mayor es **n**, más pequeño es L_n y viceversa. $L_{máx}$, $L_{mín}$ son respectivamente el nivel máximo y mínimo. Así, resulta $L_{100} = L_{mín}$ y $L_0 = L_{máx}$. En todos los casos los valores se refieren al tiempo durante el cual se realiza la medición, que puede ser tan corto como **1 minuto** o tan largo como **8 horas** ó más. Los valores más frecuentemente implementados en los instrumentos son L_{10}/L_{90} , L_5/L_{95} , L_1/L_{99} , y L_{50} . Los instrumentos más modernos proporcionan por impresora la lista completa desde L_0 hasta L_{100} .

NIVEL DE PICO

El **nivel de pico** es el valor instantáneo máximo durante un intervalo de **1 s** de duración. No debe confundirse con el nivel máximo $L_{máx}$, ya que $L_{máx}$ es el máximo valor *eficaz* y no *instantáneo*, y se refiere además a un tiempo considerable. Tiene importancia en la medición de ruidos impulsivos, en los cuales por su corta duración no contienen gran energía sonora ni son percibidos como muy ruidosos, a pesar del riesgo de causar daño auditivo que conllevan.

NIVEL SONORO PROMEDIO DIA-NOCHE (L_{dn})

Es un nivel sonoro continuo equivalente con **T = 24 hs**, penalizando con **10 dBA** (es decir incrementando) cada valor entre las 22 hs y las 7 hs:

$$L_{dn} = 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{24} \left(10 \int_{22}^{24} p_A^2(t) dt + 10 \int_0^7 p_A^2(t) dt + \int_7^{22} p_A^2(t) dt \right)}{p_{ref}^2}$$

Este parámetro mide el nivel de ruido en la comunidad, teniendo en cuenta que los ruidos en horario nocturno son más molestos o menos tolerables que en horario diurno.

NIVEL PERSONAL DE EXPOSICION DIARIA (LEP_d)

Este parámetro es el nivel sonoro de un ruido supuesto constante que posee la misma energía que el ruido al que estuvo expuesto un trabajador durante su jornada real de trabajo, que puede tener una duración mayor o menor de **8 hs**. Se diferencia del nivel sonoro continuo equivalente en que contempla la energía total recibida con independencia de la cuestión administrativa de la dedicación horaria diaria.

4. CONTROL DE EJECUCIÓN EN EL DB-HR

4.1 Control de recepción de productos



El CTE-HR, marca unas características requeridas y exigibles a los productos utilizados en la ejecución de la edificación.

Entre otras leyes destacan:

- Directiva 89/106/CEE sobre productos de construcción.
- R.D. 1630/1992, por el que se dictan disposiciones para la libre circulación de productos de construcción en aplicación de la directiva anterior.
- R.D. 1328/1995, por el que se modifican las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción en aplicación de la directiva anterior.
- Mayo 2.008, Propuesta del parlamento europeo y del consejo por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de los productos de construcción.

NOTA: Solo en algunos productos se contempla su caracterización acústica para su marcado

CE

Características exigibles a los productos.

En el DB HR se establecen unas características mínimas que debe proporcionar el fabricante:

- Para los cerramientos homogéneos
- Masa superficial en kg/m²
- Para los productos de relleno en cámaras entre cerramientos
- Resistencia al flujo del aire, r , obtenida según UNE EN 29053
- Rigidez dinámica, s' , obtenida según UNE EN 29052-1
- Para los productos utilizados en suelos flotantes y bandas elásticas
- Rigidez dinámica, s' , obtenida según UNE EN 29051-1
- Clase de compresibilidad
- Para los productos utilizados como absorbentes acústicos
- Coeficiente de absorción acústica, α , en 500, 1000 y 2000 Hz, y coeficiente de absorción acústica medio α_m

En el pliego de condiciones del proyecto de arquitectura o informe DB-HR se deben definir las características acústicas de los productos

Características exigibles a elementos constructivos.

Se establecen unas características mínimas que deben documentarse, p.ej.

- Para elementos de separación verticales:
 - o Masa superficial en Kg./m²
 - o Índice de aislamiento mínimo requerido R_A dBA
- Para los trasdosados



- o La eficacia acústica de los trasdosados para completar el aislamiento acústico del cerramiento básico, ΔR_A dBA
- Para elementos de separación horizontales:
 - o Masa superficial del forjado en Kg./m^2
 - o Índice global de reducción acústica, R_A dBA
 - o Nivel global de presión de ruidos de impacto, $L_{n,w}$ dB
- Para los suelos flotantes
 - o La eficacia acústica de los suelos flotantes frente a la transmisión de ruido de impacto, ΔL_w dB
 - o La eficacia de los suelos flotantes frente al ruido aéreo, ΔR_A dBA
- Para los techos suspendidos:
 - o La mejora del índice global de reducción acústica, ΔR_A dBA
 - o El coeficiente de absorción acústica medio, α_m , si su función es el control de la reverberación
- Para la parte ciega de las fachadas y las cubiertas:
 - o El índice global de reducción acústica R_w dB
 - o El índice global de reducción acústica R_A dBA
 - o El índice global de reducción acústica R_{Atr} dBA para ruido de automóviles
 - o Los términos de adaptación para ruido rosa, C , y para ruido de automóviles y aeronaves, C_{tr}
- Para los huecos de las fachadas y las cubiertas:
 - o El índice global de reducción acústica R_w dB
 - o El índice global de reducción acústica R_A dBA
 - o El índice global de reducción acústica R_{Atr} dBA para ruido de automóviles
 - o Los términos de adaptación para ruido rosa, C , y para ruido de automóviles y aeronaves, C_{tr}
 - o La clase de ventana según norma UNE EN12207
- Para los aireadores
 - o La diferencia de niveles normalizada, $D_{n,e,A}$ en dBA

En el DB HR se establece que en el pliego de condiciones del proyecto, deben expresarse las características acústicas de los productos y elementos constructivos obtenidas mediante ensayos en laboratorio.

- UNE EN ISO 140-3. Aislamiento acústico a ruido aéreo R
- UNE EN ISO 140-6. Aislamiento acústico a ruido impacto L_n
- UNE EN ISO 140-8. Mejora de suelos a ruido de impacto, ΔL_n
- UNE EN ISO 354. Coeficiente de absorción de materiales, α

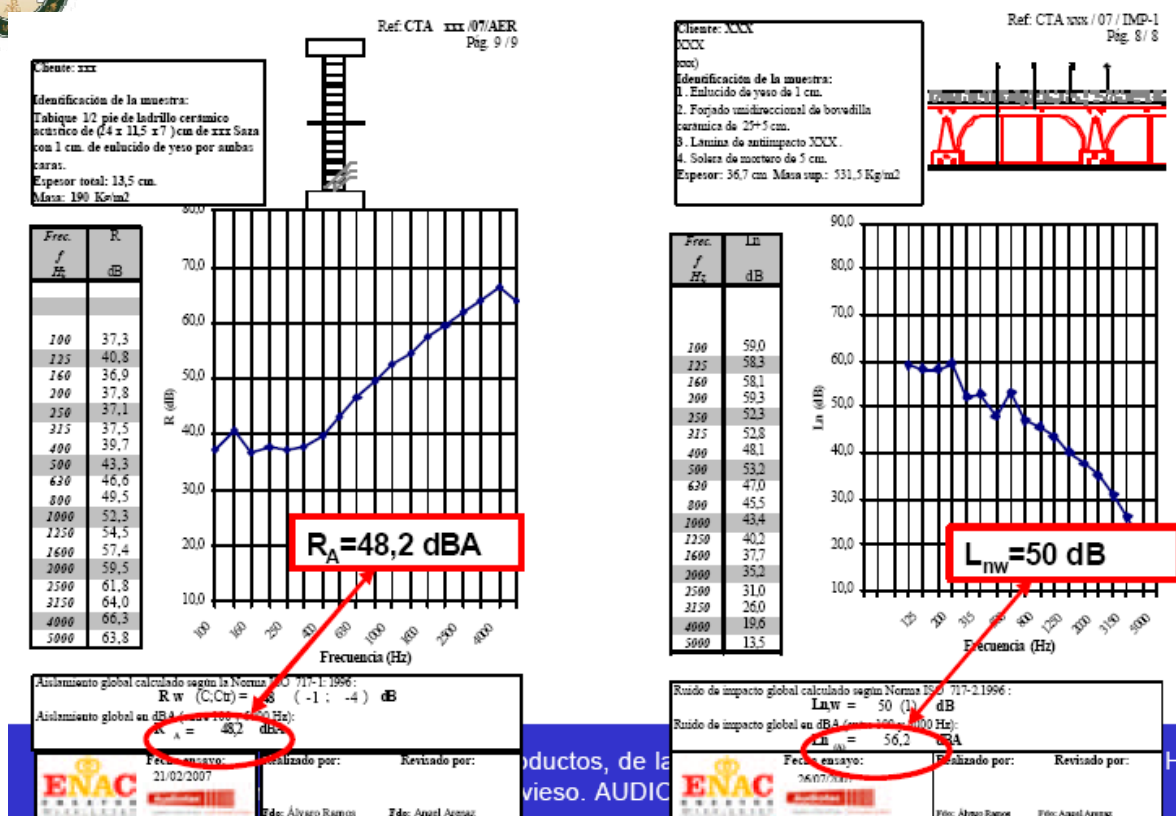


Figura 6.14. Certificado de ensayo en laboratorio.

Es importante conocer la existencia y utilizar el anexo A. Terminología, porque se declaran todos los términos contemplados en el DB HR. Por ejemplo, se define un elemento novedoso muy importante, la **Banda elástica**: Banda de material elástico de al menos 10 mm. de espesor, utilizada para interrumpir la transmisión de vibraciones en los encuentros entre particiones con suelos, techos y otras particiones. Se considera adecuados todos aquellos con rigidez dinámica, s' , menor que 100 MN/m³ tales como el poliestireno elastificado, el polietileno y otros materiales con prestaciones análogas.

En el pliego de condiciones se indicarán las condiciones particulares de control, incluyendo los ensayos necesarios. Debe comprobarse que los productos recibidos:

- Se corresponden con los del pliego de condiciones del proyecto.
- Disponen de la documentación exigida.
- Están caracterizados por las propiedades exigidas.
- Han sido ensayados.
- Importancia certificado y documentado

4.2 Control de ejecución

Con respecto a las **condiciones de ejecución** el DB-HR hace hincapié en que, las obras de construcción del edificio se ejecutarán con sujeción al proyecto, a la legislación aplicable, a las normas de la



buena práctica constructiva y a las instrucciones del director de obra y del director de ejecución de obra. Por lo tanto, en el pliego de condiciones se indicarán las condiciones particulares de ejecución de los elementos constructivos.

Se observa de todo esto y lo estudiando en otras unidades didácticas que es fundamental una **adecuada ejecución** de los sistemas constructivos. Una mala ejecución puede hacer que no se cumpla el objetivo final y lo planificado en proyecto.

Sobre los **cerramientos verticales de fábrica** se indican una serie de precauciones. P.ej.:

- Que las cajas de enchufes no sean coincidentes a ambos lados del cerramiento, salvo que se interponga entre medias una hoja de fábrica.
- Que se retaquen con mortero las rozas.
- Que las llagas y tendeles entre ladrillos se rellenen con mortero.
- Que no haya conexiones rígidas entre dos hojas de fábrica.
- Que el material absorbente cubra toda la cámara entre dos hojas de fábrica.
- Que si se emplean bandas elásticas, éstas queden adheridas al forjado mediante morteros y pastas adecuadas para cada tipo de material.
- Que en los casos de elementos de separación tipo 2 con bandas elásticas, no haya contacto directo entre el enlucido del cerramiento vertical y el del techo.

Acústica Arquitectónica

PARED DEPARADORA DE DOBLE HOJA
CON BANDAS ELÁSTICAS EN EL
PERÍMETRO DE AMBAS HOJAS.

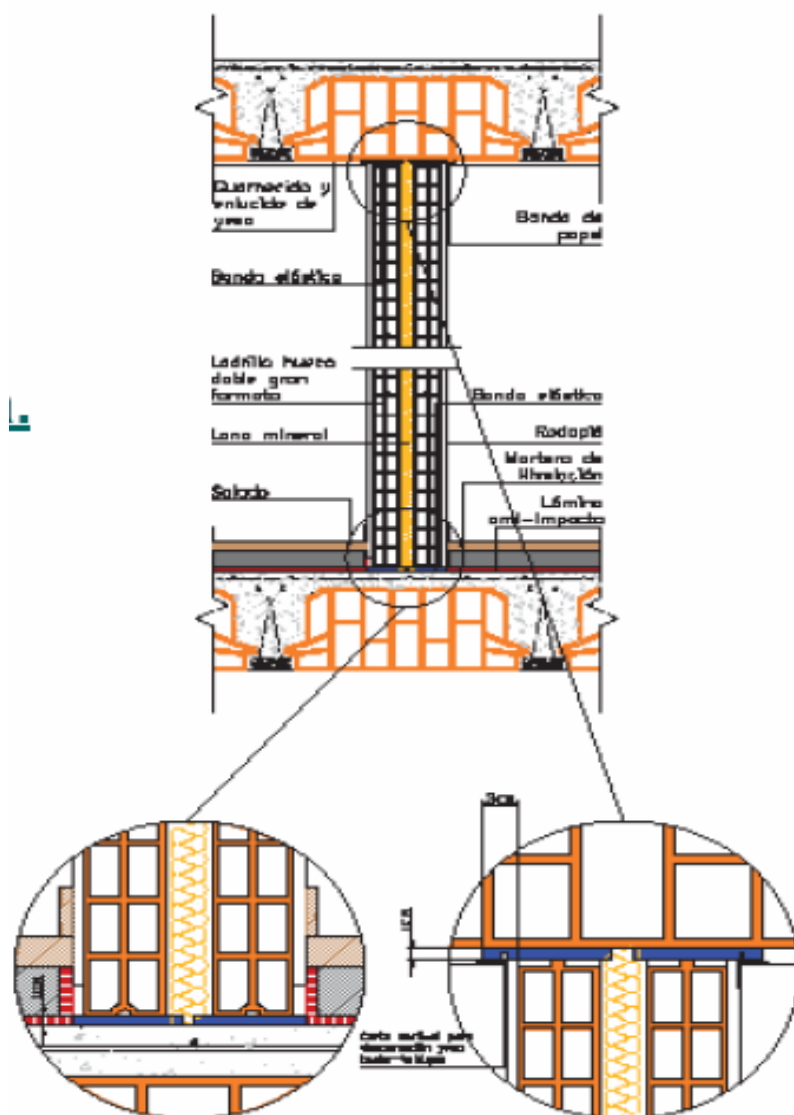


Figura 6.15. Detalle de ejecución de sistema Silensis.

Sobre los **cerramientos verticales en PYL**, se comentan los siguientes

- Que los tabiques y trasdosados de entramado autoportante se monten según las especificaciones de las normas UNE 102040 IN y 102041 IN.
- Que las cajas de enchufes no sean coincidentes a ambos lados de un cerramiento, salvo que se interponga entre medias una PYL.
- Que las PYL vayan contrapeadas para no coincidir las juntas.
- Que la cámara entre PYL esté rellena de material absorbente y con un espesor adecuado de ancho de la perfilería autoportante.
- Que los trasdosados se deje una distancia de al menos 10 mm. Entre el elemento de fábrica y la perfilería autoportante.



Cerramientos horizontales. Suelos.

- Previamente a colocar el material aislante al ruido de impactos, el forjado debe estar limpio de restos que puedan deteriorarlo.
- El material antiimpacto debe cubrir toda la superficie del forjado, y si lleva una capa de mortero, debe protegerse con una barrera impermeable.
- No debe haber contactos rígidos entre suelos flotantes y elementos verticales.

Cerramientos horizontales. Techos

- El paso de conductos por estos cerramientos se realizará de forma que no haya contacto entre ellos (interponiendo elementos elásticos).
- Los techos suspendidos o suelos registrables no deben tener continuidad entre dos recintos de distinto usuario.

Por último, a nivel general se destacan algunas de las recomendaciones para otros tipos de particiones y elementos de la edificación:

Fachadas

- Las carpinterías, los lucernarios y persianas deben realizarse para garantizar la estanqueidad a la permeabilidad al aire.

Acabados superficiales

- No deben modificar las propiedades absorbentes de los materiales empleados para acondicionamiento acústico.

Instalaciones

- Deben tener elementos elásticos y sistemas antivibratorios en todas sus sujeciones a elementos constructivos.

El caso de las instalaciones es un tema con el cual hay que tener especial cuidado, pues en si mismo es un problema complejo que, en determinadas ocasiones, requiere de una solución completa y específica de aislamiento. A continuación se muestra una figura donde observamos un ejemplo de tratamiento antivibratorio de instalaciones.

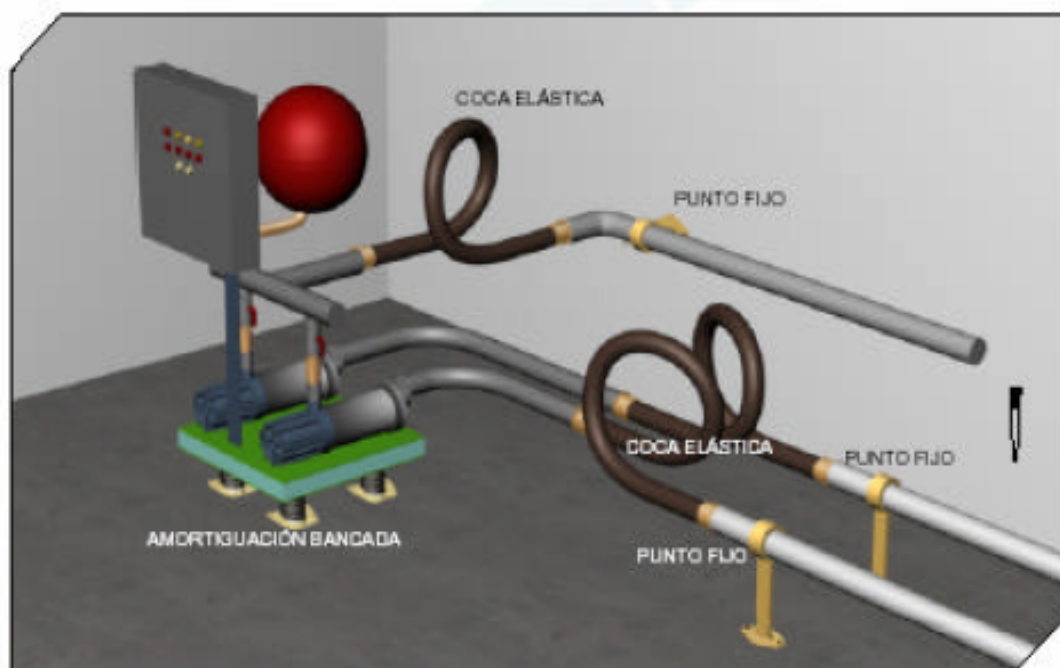


Figura 6.16. Detalle de tratamiento antivibratorio de instalaciones.



5. ENUNCIADO PROBLEMAS

Como práctica y repaso de los conceptos estudiados en todas las Unidades Didácticas, se proponen a continuación unos problemas. Le invitamos a que los resuelva y compare los resultados obtenidos con las soluciones que se facilitan más adelante.

5.1 Problema 1

Si el nivel de presión sonora en la banda de octava de **1000 Hz** (**707 Hz** a **1414 Hz**) es de **90 dB**, ¿Cuánto vale en la banda de tercio de octava centrada en **800 Hz** (**713 Hz** a **898 Hz**)?

5.2 Problema 2

Si los niveles de presión sonora en las bandas de tercio de octava de **1600 Hz**, **2000 Hz** y **2500 Hz** son de **85 dB**, **93 dB** y **89 dB** respectivamente, determinar el nivel de presión sonora en la banda de octava centrada en **2000 Hz**.

5.3 Problema 3

Un operario trabaja durante **4 hs** en un ambiente con un nivel sonoro de **85 dBA**, luego durante **2 hs** expuesto a un nivel sonoro de **95 dBA** y finalmente durante otras **2 hs** expuesto a **80 dBA**. Determinar la dosis desde el punto de vista de la reglamentación europea.

5.4 Problema 4

Determinar el nivel sonoro **A** de un ruido con el espectro de octavas de la figura siguiente.

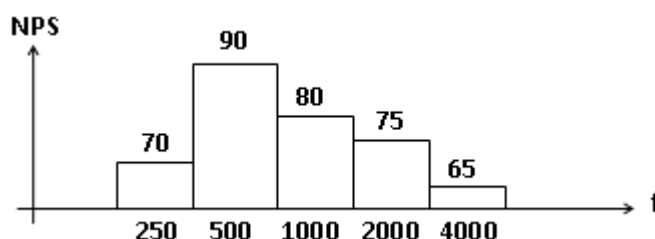




Figura problema 4. Espectro de bandas de octava para el ejemplo.

Frecuencia en Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
Ponderación en dBA	-19,1	-16,1	-13,4	-10,9	-8,6	-6,6	-4,8	-3,2	-1,0	-0,8

Frecuencia en Hz	1.000	1.250	1.600	2.000	2.500	3.150	4000	5.000
Ponderación en dBA	0	0,6	1,0	1,2	1,3	1,2	1,0	0,5

Tabla. Ponderación A para problema 4.

5.5 Problema 5

Un pequeño estudio de grabación tiene dimensiones **4 m × 3 m × 2,70 m**. **a)** Determinar los primeros **10** modos propios. **b)** Determinar cuántos modos propios existen entre **200 Hz** y **210 Hz**. **c)** Determinar cuántos modos propios hay entre **1.000 Hz** y **1.010 Hz**.

5.6 Problema 6

Calcular la frecuencia crítica de una lámina de plomo de **2 mm** y repetir para una lámina de acero de igual masa superficial.

6. SOLUCIONES PROBLEMAS

6.1 Problema 1

Resulta, aplicando la fórmula estudiada,

$$\begin{aligned}
 NPS_{1/3\text{octava}}(800) &= NPS_{\text{octava}}(1000) - 10 \log_{10} \frac{707}{185} = \\
 &= 90 \text{ dB} - 5,8 \text{ dB} = 84,2 \text{ dB}
 \end{aligned}$$



El resultado muestra que a igual densidad espectral, una banda de octava presenta mayor nivel de presión sonora que una de tercio de octava incluida en ella.

6.2 Problema 2

Aplicando la expresión estudiada, se tiene

$$\text{NPS} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{85}{10}} + 10^{\frac{93}{10}} + 10^{\frac{89}{10}} \right) = 95 \text{ dB}$$

Desde luego, el valor resulta mayor que los de cada banda individual, pues la banda de octava comprende la energía de las tres bandas de tercio de octava.

6.3 Problema 3

Para la reglamentación europea podemos aplicar la ecuación vista:

$$D = \frac{10^{8,5} \cdot 4 + 10^{9,5} \cdot 2 + 10^8 \cdot 2}{10^9 \cdot 8} \cdot 100 \% = 97 \% .$$

6.4 Problema 4

Utilizando los valores de la tabla de $A(f_i)$ en la ecuación de la suma de niveles, resulta

$$\text{NS} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{70-8,6}{10}} + 10^{\frac{90-3,2}{10}} + 10^{\frac{80}{10}} + 10^{\frac{75+1,2}{10}} + 10^{\frac{65+1}{10}} \right) = 88 \text{ dBA}$$

Obsérvese que el valor resultante es menor que el máximo valor (**90 dB**), debido a que dicho máximo se encuentra en una zona en la cual la ponderación **A** actúa atenuando, y los valores que no son atenuados son de nivel bastante menor. De no aplicar la ponderación **A** se obtendría un nivel de presión sonora total de **90,5 dBA**.

6.5 Problema 5

a) Utilizando la ecuación siguiente con $L_x = 4$, $L_y = 3$, $L_z = 2.7$, obtenemos los siguientes resultados:



$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Modo N°	n_x	n_y	n_z	f_{n_x, n_y, n_z} [Hz]
1	1	0	0	43,00
2	0	1	0	57,33
3	0	0	1	63,70
4	1	1	0	71,66
5	1	0	1	76,86
6	0	1	1	85,70
7	2	0	0	86,00
8	1	1	1	95,89
9	2	1	0	103,35
10	2	0	1	107,02

Los tres primeros corresponden a modos axiales, y los otros son tangenciales excepto el modo 8, que es oblicuo. Se observa que estos primeros modos normales corresponden a frecuencias bastante bajas.

b) Podemos calcular la cantidad de modos en un intervalo de frecuencias mediante la ecuación siguiente:

$$\Delta N \cong \frac{dN}{df} \Delta f = \frac{4\pi V f_0^2}{c^3} \Delta f$$

$$\Delta N = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2,7 \cdot 200^2}{344^3} 10 = 4 .$$

c) Análogamente,

$$\Delta N = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2,7 \cdot 1.000^2}{344^3} 10 = 100 .$$



En la región de **1 KHz** en sólo **10 Hz** hay **100** modos normales, ya que los modos se encuentran mucho más cerca unos de otros.

6.6 Problema 6

a) La densidad del plomo es 11.300 kg/m³, y su módulo de Young 1,5×10¹⁰ N/m². Por consiguiente,

$$f_{c,Pb} = \frac{345^2}{3,1416 \cdot 0,002} \sqrt{\frac{3 \cdot 11300}{1,5 \times 10^{10}}} = 28,6 \text{ kHz} .$$

b) Dado que la densidad del acero es 7.800 kg/m³, para tener igual densidad superficial se requiere un espesor de 2,9 mm. A su vez el módulo de Young vale 2×10¹¹ N/m², de donde

$$f_{c,Fe} = \frac{345^2}{3,1416 \cdot 0,002} \sqrt{\frac{3 \cdot 7800}{2 \times 10^{11}}} = 4,5 \text{ kHz} .$$

Vemos que $f_{c,Fe} \ll f_{c,Pb}$. Esto se debe a la menor rigidez del plomo. Esta es la razón por la cual el plomo es un excelente aislador acústico, permitiendo extender el rango de frecuencias controlado por la masa a todo el espectro audible.
