

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA (T1)

ACÚSTICA FÍSICA

Fundamentos de Acústica

Edición 2011-2012

Profesor: Juan M. Navarro

UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN ANTONIO DE MURCIA



Contenido

1. PRESENTACIÓN DE LA ASIGNATURA.....	3
Objetivos específicos de la asignatura	3
Resultados de Aprendizaje	3
Bibliografía y fuentes de referencia	4
2. ACÚSTICA FÍSICA.....	4
2.1 Naturaleza del sonido	4
2.1.1 Sonido	4
2.1.2 Presión acústica	5
2.1.3 Periodo y frecuencia.....	6
2.1.4 Velocidad de propagación del sonido (c) y velocidad vibración de las partículas (v). 7	
2.1.5 Longitud de onda.....	9
2.1.6 Impedancia acústica.....	9
2.1.7 Sonidos periódicos y tonos puros	10
2.2 Energía de una onda sonora	12
2.2.1 Potencia sonora	13
2.2.2 Intensidad sonora.....	13
2.3 Medición del campo acústico.....	14
2.3.1 Nivel de presión sonora	14
2.3.2 Espectro de los sonidos	15
2.4 Fuentes sonoras	18
2.4.1 Fuente esférica y fuente puntual.....	19
2.4.2 Fuente cilíndrica y fuente lineal.....	21
2.4.3 Fuente plana	23
2.4.4 Fuente múltiples o multipolos.....	24



1. PRESENTACIÓN DE LA ASIGNATURA

La asignatura “Fundamentos de Acústica” busca dotar al alumno de los conocimientos básicos para afrontar las asignaturas posteriores relacionadas con el área de ingeniería acústica (procesado de audio y video, acústica arquitectónica, electroacústica y audio digital). Suministrar una introducción a los problemas y cuestiones más genéricas de la Acústica: fundamento de las ondas sonoras y su propagación, tanto en el aire como en el agua; mecanismo de la audición y el efecto del sonido sobre el medio ambiente.

Unidad Didáctica I: Ondas y vibraciones.

Unidad Didáctica II: Acústica Aplicada.

Objetivos específicos de la asignatura

- 1- Comprender, interpretar, analizar y aplicar los conceptos y métodos de las vibraciones mecánicas a la comprensión de la generación y propagación de los distintos tipos de ondas sonoras.
- 2- Comprender, interpretar, analizar y aplicar los conceptos y métodos de la propagación de ondas sonoras en el interior de un recinto cerrado a la comprensión de los criterios de optimización de reverberación, características geométricas de una sala (forma, volumen, planta, materiales utilizados en suelo, techo, paredes) de acuerdo con su uso.
- 3- Comprender, interpretar, analizar y aplicar los conceptos y métodos básicos de la propagación de las ondas sonoras en el mar a la comprensión de los criterios básicos a emplear en proyectos de sonorización submarina.
- 4- Comprender, analizar y aplicar los conceptos y métodos básicos de propagación de los sonidos en la atmósfera a la determinación de los niveles sonoros producidos por un foco sonoro en función de la distancia, absorción de la atmósfera, naturaleza del suelo, gradientes de viento y temperatura y de la presencia de obstáculos.
- 5- Comprender, analizar y aplicar los conceptos y métodos básicos de la propagación de los sonidos en la atmósfera a la valoración de la molestia que producen en las personas, de acuerdo con los criterios físicos y legales que regulan el impacto acústico medioambiental.

Resultados de Aprendizaje

- Aprender los fundamentos básicos de propagación de una onda sonora en el exterior y en el interior de recintos.
- Saber los principios de la generación y radiación del sonido de las fuentes sonoras básicas.
- Resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones y creatividad de forma individual y en grupo.
- Saber comunicar y transmitir sus conocimientos, habilidades y destrezas.
- Conocer el funcionamiento del oído y la voz humana y sus características, así como la afección del ruido en los seres humanos, obteniendo capacidad de analizar y valorar el impacto social y



medioambiental de la contaminación acústica.

- Aprender los fundamentos básicos de propagación de una onda sonora en el medio acuático y sus aplicaciones tecnológicas.

Bibliografía y fuentes de referencia

Para el óptimo seguimiento y estudio de la asignatura se recomienda la lectura de uno de los siguientes libros de la bibliografía básica.

- **Llinares J., Llopis A., Sancho J.** Acústica Arquitectónica y Urbanística SPUPV, 2002
- **Recuero, M.** Ingeniería acústica Editorial Paraninfo

Bibliografía complementaria

- **Kinsler L. E., Frey A. R., Coppens A. B., Sanders J. V.** Fundamentos de Acústica Limusa, México, 1992
- **Beranek, Leo L.** Acústica Editorial Hispano América, 1969, Buenos Aires, Argentina.
- **William W. Seto** Teoría y problemas de acústica McGraw-Hill, México (1973)

NOTA IMPORTANTE: La documentación técnica entregada a través del campus virtual (como este documento) no representa sola y exclusivamente la guía o documento a estudiar. Es necesario que el alumno complemente estos conocimientos básicos con la consulta de la bibliografía recomendada.

2. ACÚSTICA FÍSICA

2.1 Naturaleza del sonido

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·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)

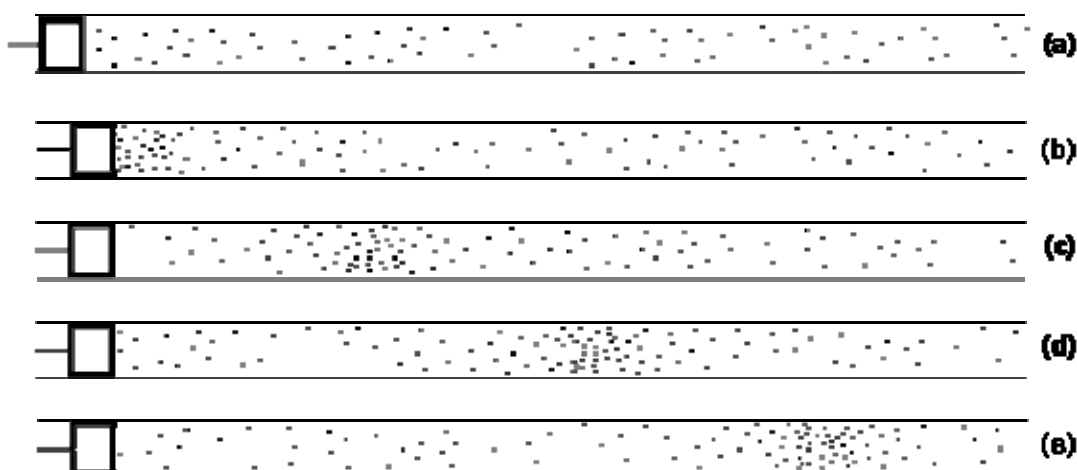


Figura 1.1. Propagación de una perturbación en un tubo. (a) El aire en reposo (moléculas repartidas uniformemente). (b) Ante una perturbación el aire se concentra cerca del pistón. (Aumenta la presión). (c), (d), (e) La perturbación se propaga alejándose de la fuente.

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

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



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

(**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

$$p \ll P_0$$

(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 **P₀**, 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).

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).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

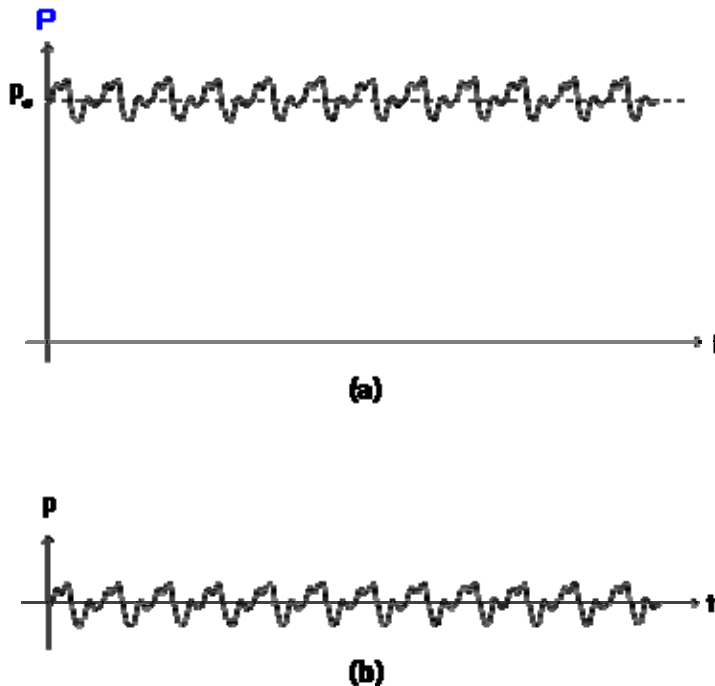


Figura 1.2. (a) Evolución en el tiempo de la presión de un sonido. Se muestra (fuera de escala) una pequeña fluctuación periódica alrededor de la presión atmosférica P_0 (presión de equilibrio). (b) Se ha removido la presión atmosférica quedando sólo la presión sonora p .

2.1.4 Velocidad de propagación del sonido (c) y velocidad vibración de las partículas (v)

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 ($P=1 \text{ atm}$ $T=20^\circ \text{C}$), damos, a título de ejemplo, la tabla siguiente para algunos elementos:



<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 v**. Una de las razones es que para una onda plana la presión resulta ser proporcional a la velocidad:

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

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 **m/s = 344 m/s**

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



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

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

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:

$$Z_a = \frac{p}{v}$$

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, $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$, o en Rayls, $(\text{Pa} \cdot \text{s})/\text{m}$.

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



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

SUSTANCIA	IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA	
	$\text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$	$(\text{Pa} \cdot \text{s})/\text{m}$
SÓLIDOS		
Hierro fundido	$270 \cdot 10^4$	$270 \cdot 10^5$
Hierro forjado	$400 \cdot 10^4$	$400 \cdot 10^5$
Cinc	$240 \cdot 10^4$	$240 \cdot 10^5$
Acero	$390 \cdot 10^4$	$390 \cdot 10^5$
Granito	$162 \cdot 10^4$	$162 \cdot 10^5$
Mármol	$99 \cdot 10^4$	$99 \cdot 10^5$
LÍQUIDOS		
Agua (13 °C)	$144 \cdot 10^3$	$144 \cdot 10^4$
Agua salada	$155 \cdot 10^3$	$155 \cdot 10^4$
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.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

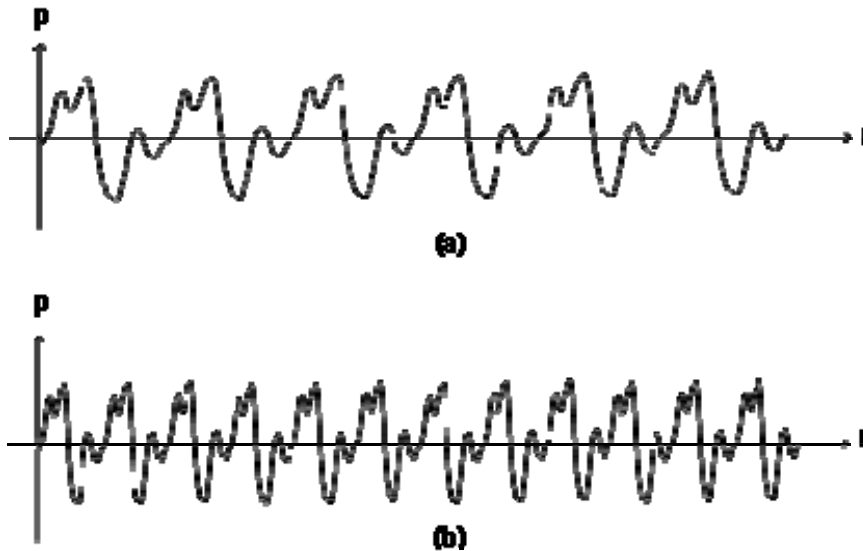


Figura 1.3. Dos sonidos periódicos: (a) grave; (b) agudo.

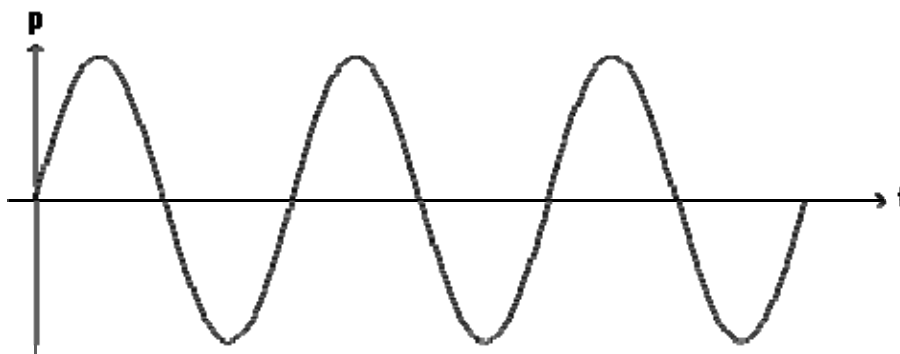


Figura 1.4. Un tono puro (onda senoidal). Se muestran tres ciclos.

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

Fundamentos de Acústica

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.

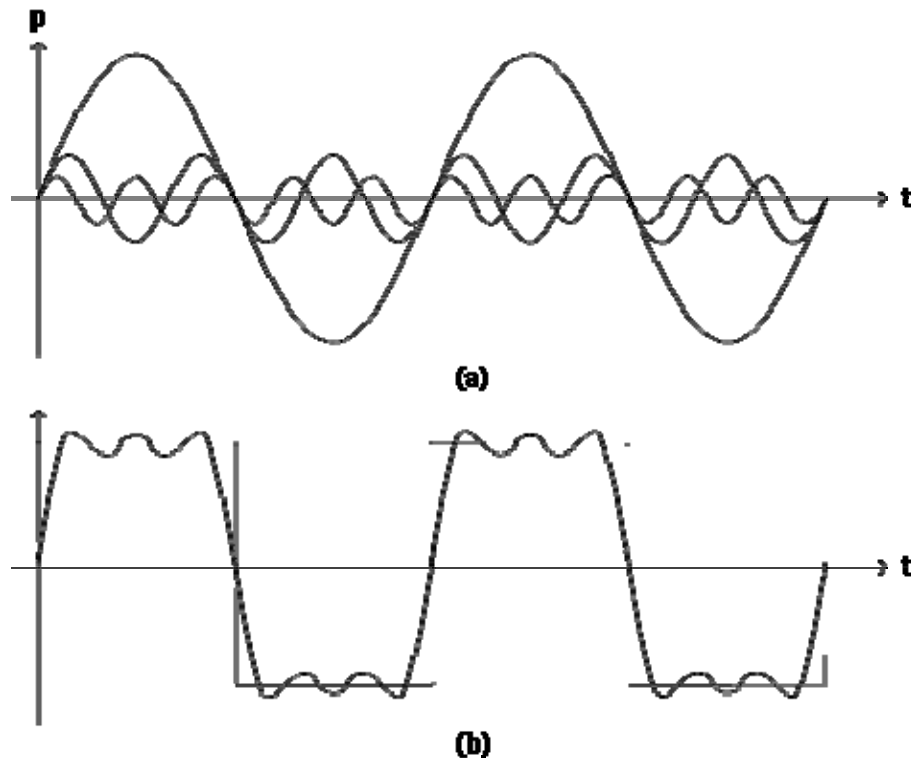


Figura 1.5. (a) Los tres primeros armónicos de una onda cuadrada, de frecuencias f_0 , $3f_0$ y $5f_0$. (b) El resultado de superponer los tres armónicos, comparado con la onda cuadrada. Si bien tres armónicos son poca cantidad, vemos que comienza a esbozarse la forma de la onda cuadrada.

2.2 Energía de una onda sonora

La **energía** es uno de los conceptos centrales de la física, debido a que es una propiedad común a todos los sistemas físicos (mecánicos, electromagnéticos, termodinámicos, químicos, etc.) con la característica de que puede transferirse entre sistemas vinculados, obedeciendo a un *principio de conservación*.

Los sistemas acústicos son casos particulares de sistemas mecánicos, por lo cual la **energía acústica** puede descomponerse en **energía potencial** y **energía cinética**. Como el campo sonoro varía con la posición, su energía se describe mejor mediante la **densidad de energía D** , o energía por unidad de volumen, en cada punto. Resulta:

$$D = \frac{1}{2} (\rho_0 \cdot v^2 + \frac{p^2}{\rho_0 \cdot c^2}) . \quad (1.9)$$



El primer término, $\frac{1}{2}\rho_0 v^2$, corresponde a la energía cinética, y el segundo, $\frac{1}{2}p^2/\rho_0 c^2$, a la energía potencial. Esta densidad de energía es función de la posición y del tiempo. En el caso de una **onda plana** (en la cual la presión es constante sobre los planos perpendiculares a la dirección de propagación), ambos términos se hacen iguales, y entonces

$$\text{Donda plana} = \frac{p^2}{\rho_0 \cdot c^2} \quad (1.10)$$

Se puede apreciar que la energía de una onda plana es proporcional a la presión elevada al cuadrado. Este resultado es similar al de los circuitos eléctricos, según el cual la potencia es proporcional a la tensión eléctrica al cuadrado.

2.2.1 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

2.2.2 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:

$$i = D \cdot c = \frac{p^2}{\rho_0 c} = \frac{p^2}{Z_a}$$

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

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt$$

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,



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

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

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

$$I = \frac{P_{\text{ef}}^2}{\rho_0 c}$$

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

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

la relación entre la presión eficaz y la máxima resulta ser

$$P_{\text{ef}} = \frac{P_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$$

de modo que

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

Para un sonido periódico cualquiera, se cumple:

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

donde $P_{\text{ef}n}$ 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*.

2.3 Medición del campo acústico

2.3.1 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



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

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

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

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

El nivel de presión sonora se expresa en **decibelios (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

2.3.2 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 .



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

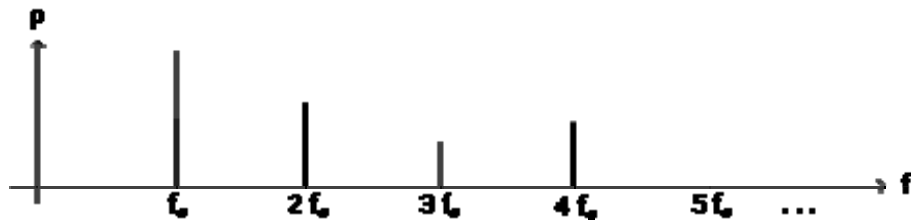


Figura 1.6. Espectro de amplitudes de un sonido periódico.

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).

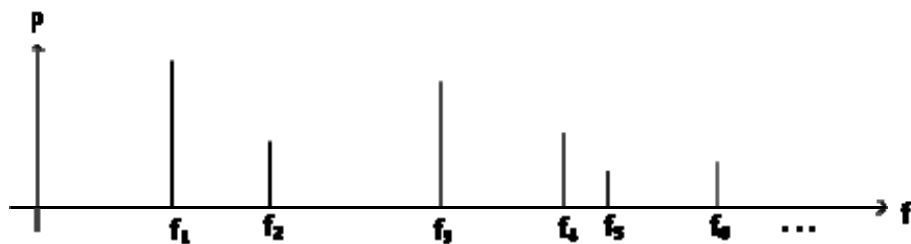


Figura 1.7. Ejemplo de espectro discreto no periódico.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

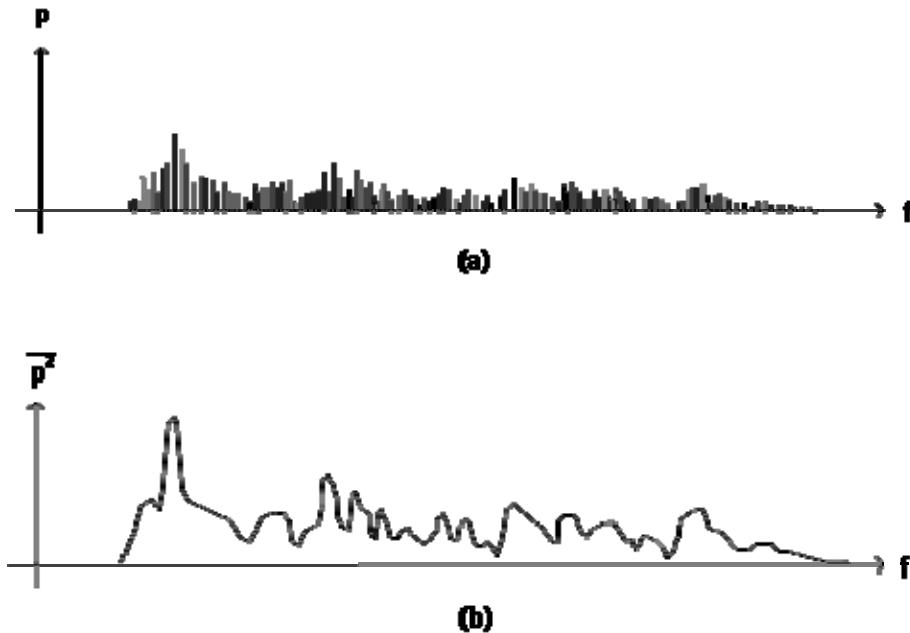


Figura 1.8. Ejemplo de espectro continuo. En (a) se muestran las líneas espectrales. En (b), la correspondiente densidad espectral.

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.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

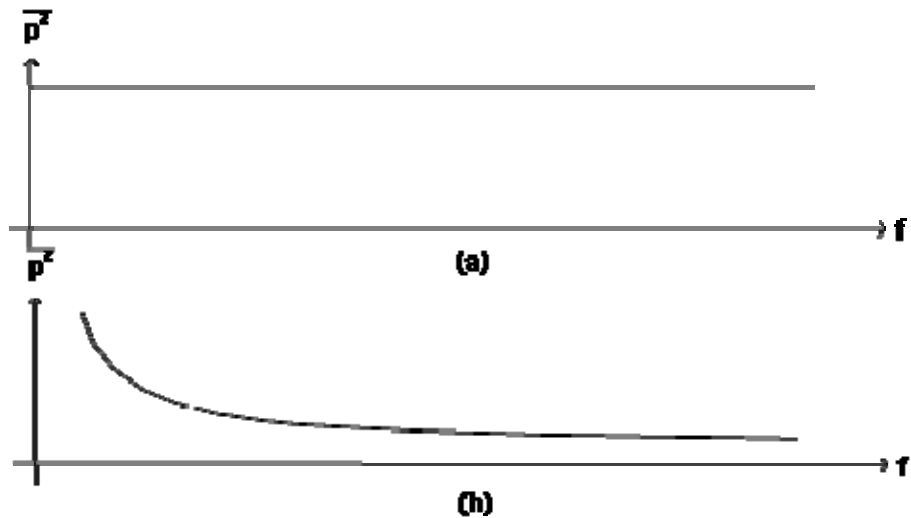


Figura 1.9. (a) Espectro de un ruido blanco. (b) Espectro de un ruido rosa.

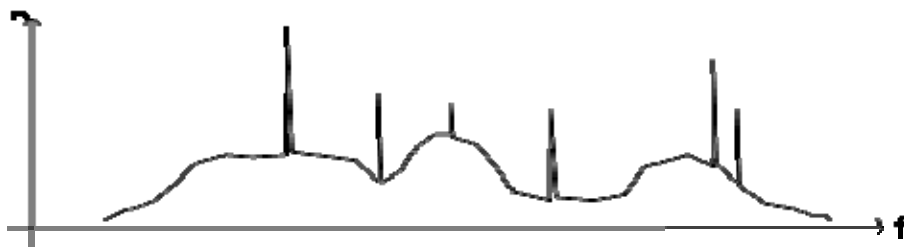


Figura 1.10. Ejemplo de espectro mixto.

2.4 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.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

2.4.1 Fuente esférica y fuente puntual

La fuente sonora más simple es la **fuente 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 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:

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

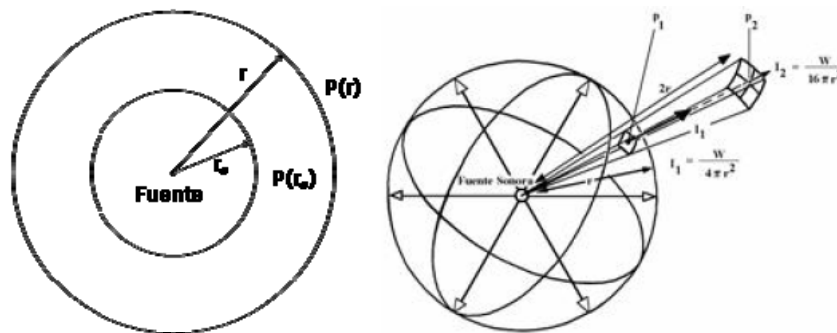


Figura 1.11. Una fuente esférica para la cual se muestran dos esferas de presión constante $P(r_0)$ y $P(r)$



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

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

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

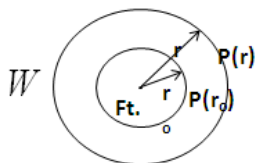
$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad \text{Ondas Esféricas}$$

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

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

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



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

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

$$\begin{aligned} L_p &= L_w - 10 \log 4\pi r^{-2} dB = \\ &= L_w - 20 \log r - 11 dB \end{aligned}$$

2.4.2 Fuente cilíndrica y fuente lineal

Las **fuentes cilíndricas** generan un campo acústico que para cada tiempo t es constante sobre superficies cilíndricas concéntricas, es decir que comparten un mismo eje, denominado **eje acústico** o simplemente **eje** de la fuente. Para el caso de una onda senoidal, llamando $P(r)$ a la amplitud de la presión a la distancia r del eje, resulta

$$P(r) = \sqrt{\frac{r_0}{r}} P(r_0) , \quad (1.11)$$

donde r_0 es una distancia cualquiera y $P(r_0)$ la amplitud a dicha distancia (figura 1.12). Esta ecuación indica que *la amplitud de la presión varía inversamente con la raíz cuadrada de la distancia al centro*. Esta relación es válida también para la presión eficaz:

$$P_{ef}(r) = \sqrt{\frac{r_0}{r}} P_{ef}(r_0) . \quad (1.12)$$

De esta expresión se concluye que para fuentes cilíndricas el nivel de presión sonora disminuye **3 dB** cada vez que se duplica la distancia:



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

$$\text{NPS}(2r) = \text{NPS}(r) - 3 \text{ dB} . \quad (1.13)$$

Este resultado contrasta con el correspondiente a una fuente esférica, en que la reducción era de **6 dB** en lugar de **3 dB**. La razón es que una fuente cilíndrica se puede pensar como una disposición lineal de un gran número de fuentes esféricas iguales (idealmente, infinitas). Al duplicar la distancia al eje de la fuente, la distancia a las fuentes más próximas efectivamente se duplica, pero las más distantes sólo se alejan en una proporción mucho más pequeña, y de esa manera compensan la reducción en **6 dB** de las fuentes próximas.

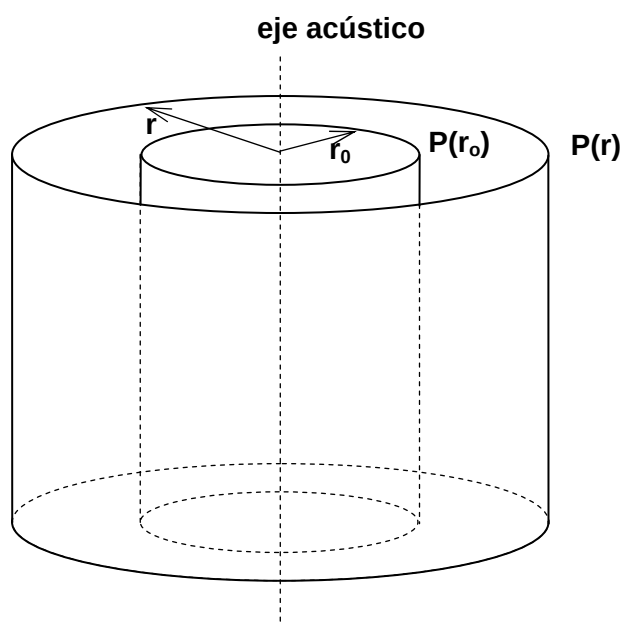


Figura 1.12. Una fuente cilíndrica para la cual se muestran dos superficies cilíndricas sobre las cuales la presión es constante, respectivamente $P(r)$ y $P(r_0)$. La longitud se ha acortado a los efectos de la representación.

Igual que en el caso anterior, mediante la ecuación de la intensidad sonora se determina cómo varía la intensidad con la distancia:

$$I(r) = \frac{r_0}{r} I(r_0) . \quad (1.14)$$

Vemos que para fuentes cilíndricas disminuye más lentamente con la distancia que para fuentes esféricas.

Ejemplos de fuentes cilíndricas son las tuberías largas por las cuales circulan grandes caudales generando turbulencias que hacen vibrar la tubería emitiendo sonido. Otro ejemplo son las carreteras



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

de gran circulación, en donde cada automotor individual es equivalente aproximadamente a una fuente esférica. No obstante, la aproximación no es tan buena como en los ejemplos de fuentes esféricas, dado que la fuente cilíndrica ideal es de longitud infinita.

Las **fuentes lineales** son el caso límite de las cilíndricas, cuando el diámetro de la fuente es despreciable frente a la longitud de onda emitida, y en la práctica sólo se utilizan para modelizar fuentes como las mencionadas.

2.4.3 Fuente plana

Las **fuentes planas** crean un campo acústico que para cada tiempo t es constante sobre superficies planas paralelas. Generan el tipo de onda analíticamente más sencillo: la **onda plana**, que se propaga perpendicularmente a dichos planos (figura 1.13).

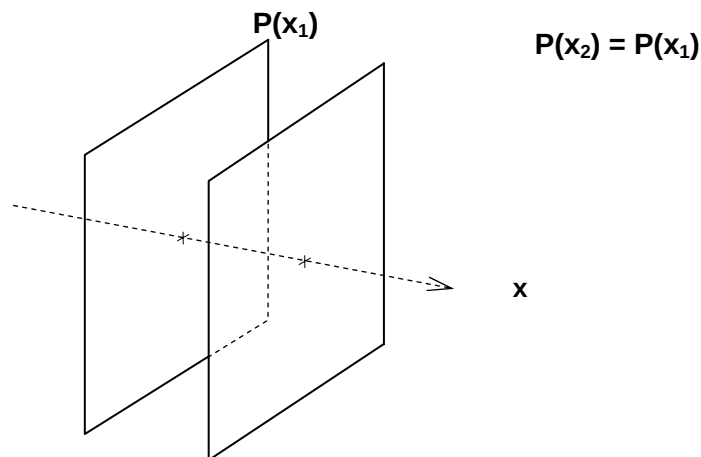


Figura 1.13. Una fuente plana, caracterizada por producir un campo acústico que tiene amplitud constante sobre planos perpendiculares a la dirección de propagación. A su vez, la amplitud es la misma en todos los planos.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Para ondas senoidales, la amplitud de una onda plana es constante con la distancia x a la fuente:

$$P(x) = \text{constante} , \quad (1.15)$$

y análogamente para la presión eficaz:

$$P_{\text{ef}}(x) = \text{constante} . \quad (1.16)$$

Esto a su vez implica que *en una onda plana la intensidad media también es constante con la distancia*, a diferencia de lo que sucedía en las fuentes esférica y cilíndrica.

No existen ejemplos físicos de fuentes sonoras planas en campo abierto, ya que la extensión de tales fuentes es, idealmente, infinita. Posibles aproximaciones pueden ser una onda esférica o cilíndrica (o, para el caso, proveniente de cualquier fuente) a gran distancia del centro o eje de la fuente. Otro ejemplo de fuente aproximadamente plana sería el ruido de una muchedumbre desde cierta altura (menor que la extensión de la muchedumbre de modo que el efecto de los bordes, es decir de la falta de infinitud, pueda despreciarse). En recintos cerrados con forma rectangular, bajo ciertas condiciones es posible generar ondas planas con una fuente cualquiera; por ejemplo, si la distancia entre paredes paralelas es múltiplo de la semilongitud de onda ($\lambda/2$) (ver Acústica de Recintos).

2.4.4 Fuente múltiples o multipolos

Las fuentes estudiadas hasta ahora pueden considerarse como **fuentes elementales o básicas**, en el sentido de que otras fuentes pueden considerarse como combinación de aquéllas. Particularmente, cualquier fuente puede pensarse como la superposición de cierta cantidad de fuentes puntuales.

Una característica importante de este tipo de fuentes es su **direccionalidad**. En las fuentes puntuales la presión a una dada distancia es la misma en todas direcciones, pero en las fuentes múltiples ello no sucede. Para verlo consideremos dos fuentes puntuales iguales que emiten sonidos en fase (figura 1.14). El punto **Q** está equidistante de ambas fuentes, y entonces los sonidos de ambas llegan al mismo tiempo y se suman. El punto **P**, en cambio, está más cerca de **A** que de **B**, razón por la cual el sonido de **A** llega antes a **P** que el de **B**, produciendo un defasaje que puede llegar a anular el campo resultante. La diferencia de distancias se debe a la diferente orientación con respecto al eje de las fuentes.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

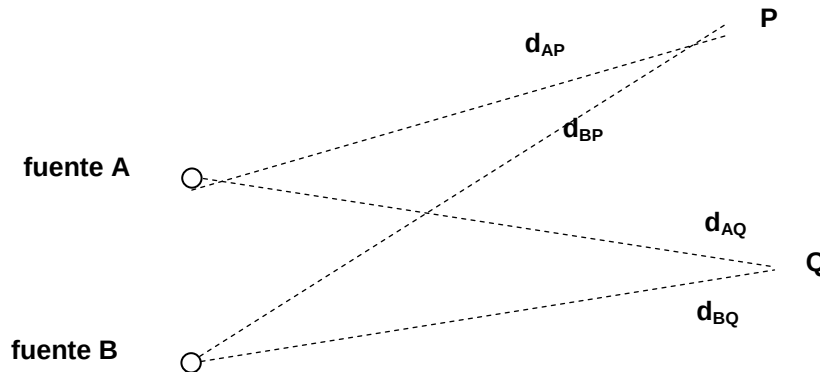


Figura 1.14. Una fuente compuesta por dos fuentes puntuales iguales, **A** y **B**. La distancia entre cada fuente y el punto **Q** es la misma, y entonces los sonidos de **A** y de **B** llegan al mismo tiempo a **Q**. Para el punto **P**, que tiene otra orientación, las distancias no son iguales, y en consecuencia los sonidos de ambas fuentes llegan a destiempo.

Dentro de las fuentes múltiples, existen algunas que permiten representar algunos mecanismos habituales de generación de ruido. La primera es el **dipolo acústico** o **doblete**, caracterizado por dos fuentes puntuales de la misma frecuencia pero fase opuesta, es decir que mientras una perturba el aire que la circunda aumentando su presión, la otra lo hace disminuyéndola, como se muestra en la figura 1.15.

Este tipo de fuente modeliza el ruido emitido por la vibración de láminas, placas o membranas con ambos lados expuestos, como por ejemplo un altoparlante sin baffle o una hélice de ventilador. Las dimensiones con respecto a la longitud de onda emitida deben ser pequeñas, ya que de lo contrario la propia superficie actúa como barrera, alterando el campo sonoro generado.

Para describir las características direccionales de ésta y otras fuentes se utiliza un **diagrama direccional**, **diagrama polar** o **patrón polar**, que representa en coordenadas polares el valor eficaz de la presión a una distancia determinada, en las diversas direcciones. En la figura 1.18 se muestra el diagrama direccional de un dipolo, para tres valores de longitud de onda λ , tomados con relación a la distancia d entre las fuentes puntuales del dipolo. Vemos que las diversas curvas presentan una estructura de **lóbulos**, es decir zonas que arrancan en 0 y alcanzan máximos. Cuando $\lambda = d$ aparecen cuatro lóbulos, y cuando $\lambda = 1,5d$ y $\lambda = 2d$, dos lóbulos. En general, *cuanto más pequeña es la longitud de onda el diagrama contiene mayor cantidad de lóbulos*, lo cual significa que pequeñas variaciones de dirección pueden provocar grandes variaciones de presión sonora. De todas maneras, tengamos en cuenta que este patrón polar es válido únicamente en **campo libre**, es decir en ausencia



de reflexiones¹. También se observa que cualquiera sea la longitud de onda, siempre el campo se anula para $\theta = 0^\circ$, debido a que para esa dirección las distancias a ambas fuentes son iguales, y en consecuencia se conserva la relación de fases original, es decir la oposición de fase, que anula el campo resultante.

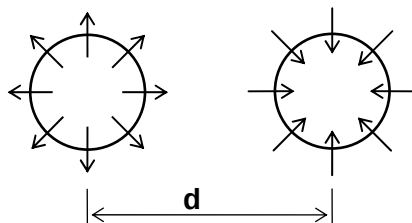


Figura 1.15. Un dipolo o doblete acústico formado por dos fuentes puntuales en oposición de fase

Si llamamos P_{ef0} a la presión eficaz de una de las fuentes puntuales a una distancia r_0 , entonces la presión eficaz del dipolo a una distancia r y con una orientación θ resulta, siempre y cuando sea $r \gg d$:

$$P_{ef}(r) = \frac{2 P_{ef0} r_0}{r} \left| \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right) \right|. \quad (1.35)$$

De esta ecuación se deducen los diagramas direccionales anteriores. También permiten verificar que cuando λ es pequeño comparado con d aparecen varios lóbulos, ya que al variar θ de 0° a 90° el argumento del primer seno describe varios giros, lo cual implica varias fluctuaciones entre 0 y 1.

El diagrama de la figura 1.16 está representado en coordenadas polares *lineales*, es decir que la presión es proporcional a la distancia radial entre la curva y el centro. En muchos casos, sin embargo, es más conveniente utilizar coordenadas polares *radialmente logarítmicas*, en las cuales se representa el *nivel de presión sonora* en lugar de la presión eficaz. En efecto, con el diagrama lineal gran cantidad de presiones *auditivamente significativas* se concentran cerca del centro del diagrama y no pueden apreciarse, lo cual no sucede con el diagrama logarítmico (ver figura 1.19). En este tipo de diagramas se toma el nivel de referencia (0 dB) como el máximo valor posible, de allí que los valores sean negativos.

¹ Esta situación puede lograrse artificialmente dentro de una **cámara anecoica**, es decir una habitación tratada acústicamente para eliminar casi por completo las reflexiones.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

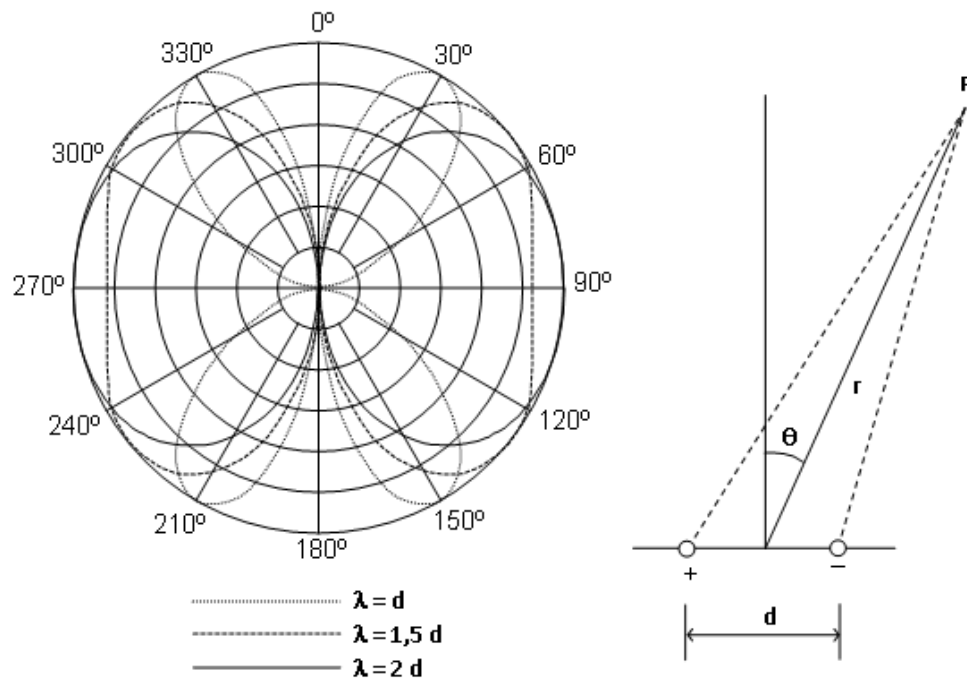


Figura 1.16. Diagrama direccional del doblete acústico para tres valores de longitud de onda λ relativos a la distancia d entre las fuentes puntuales.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

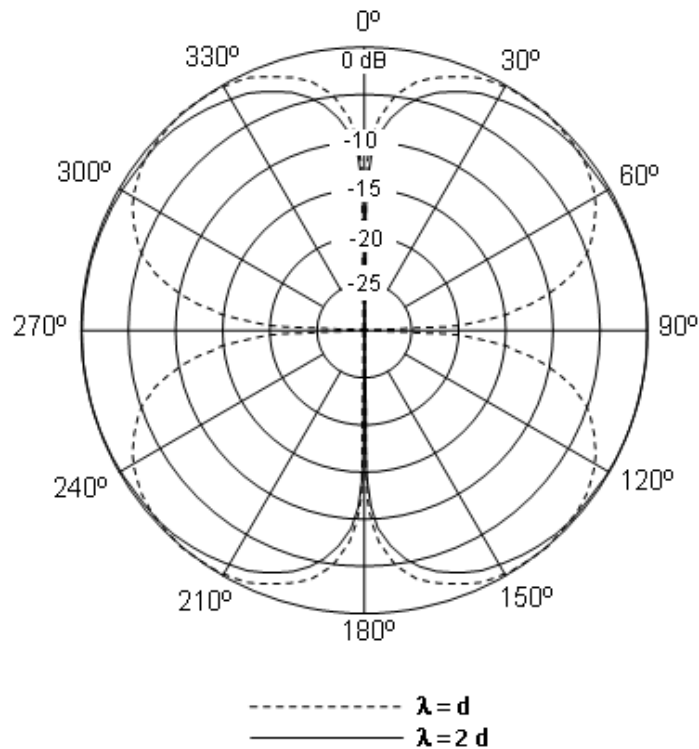


Figura 1.17. Diagrama direccional del doblete acústico representado en diagrama polar logarítmico. Se han representado dos valores de longitud de onda λ relativos a la distancia d entre las fuentes.

NOTA: Debe observarse que en general, por debajo del mínimo valor representado (en el caso de la figura 1.17, -25 dB), las curvas carecen de sentido, ya que allí el diagrama debería volverse lineal nuevamente, debido a que *no es posible insertar infinitas divisiones equiespaciadas en un espacio finito*.

Una segunda fuente múltiple de interés es el **cuadripolo longitudinal**, formado por dos dipolos enfrentados (figura 1.18). Esta fuente sirve de modelo para el ruido generado

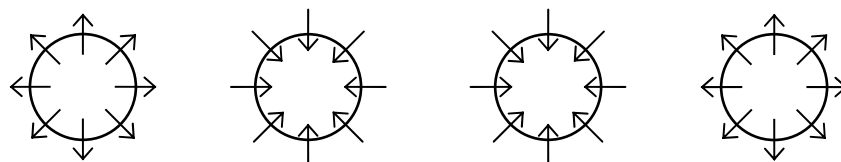


Figura 1.18. Un **cuadripolo lateral**, formado por dos dipolos enfrentados.



por dos objetos rígidos que impactan entre sí. En la figura 1.19 se muestra el diagrama polar de esta configuración de fuentes puntuales. Se observa que es más lobulada que el correspondiente al dipolo acústico. Esto sucede porque existen ahora interferencias entre 4 fuentes, mientras que antes sólo interferían dos.

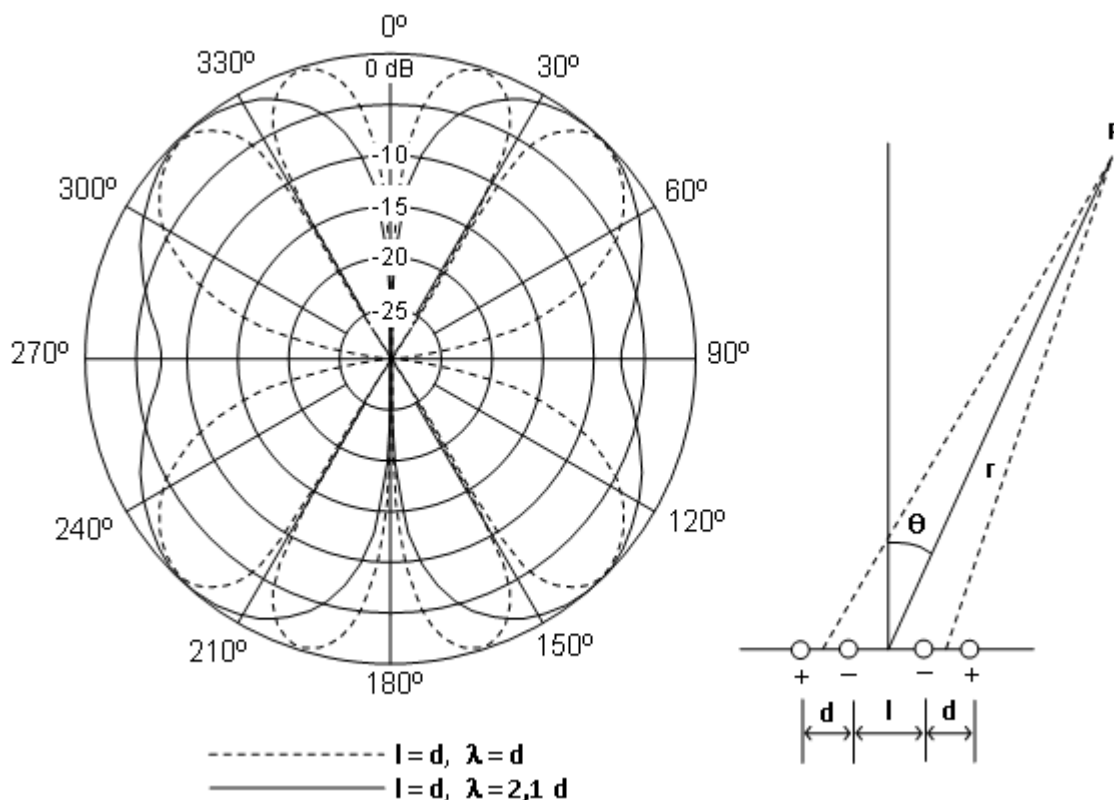


Figura 1.19. Diagrama direccional del **cuadripolo acústico** representado en diagrama polar logarítmico. Se han representado dos valores de longitud de onda λ relativos a la distancia d entre las fuentes.

La descripción matemática de la presión eficaz a una distancia r de un cuadripolo compuesto por dos dipolos como se indica en la figura 1.19 es, para $r \gg l, d$:

$$P_{ef}(r) = \frac{2 P_{ef0} r_0}{r} \left| \cos\left(\frac{\pi(l+2d)}{\lambda} \sin \theta\right) - \cos\left(\frac{\pi l}{\lambda} \sin \theta\right) \right|, \quad (1.36)$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

donde, igual que antes, P_{efo} es la presión eficaz de una de las fuentes puntuales a una distancia r_o .

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA (T2)

ACÚSTICA FISIOLÓGICA

Fundamentos de Acústica

Edición 2011-2012

Profesor: Juan M. Navarro

UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN ANTONIO DE MURCIA



Contenido

1. ACÚSTICA FISIOLÓGICA	4
1.1 Audición	4
1.1.1. Oído externo.....	5
1.1.2. Oído medio.....	6
1.1.3. Oído interno.....	7
1.2. Efectos auditivos del ruido	7
1.2.1. Presbiacusia y socioacusia	7
1.2.2. Desplazamiento temporal del umbral.....	8
1.2.3. Audiometría tonal	9
1.2.4. Logaudiometría	11
1.2.5. Hipoacusia conductiva	12
1.2.6. Hipoacusia perceptiva	13
1.2.7. Pérdida auditiva e inteligibilidad de la palabra.....	15
1.2.8. Hipoacusia profesional	16
1.2.9. Determinación del riesgo auditivo	18
1.3. Parámetros objetivos y subjetivos de la audición.....	19
1.3.1. Bandas de frecuencias.....	19
1.3.2. Intensidad.....	21
1.3.3. Sonoridad	22
1.3.4. Efecto de enmascaramiento	25
1.3.5. Molestia	26
1.3.6. Vibraciones.....	27
1.4. El mecanismo de la voz.	28
1.4.1. Composición del órgano de la voz	28
1.4.2. Características acústicas.	30
1.5. Interferencia en la palabra	34
1.5.1. Tests de articulación	35
1.6. Efectos no auditivos del ruido	38



1.6.1. Efectos sobre la voz.....	38
1.6.2. Otros efectos clínicos.....	38
1.6.3. Efectos psicológicos.....	39
1.7. Algunos criterios psicoacústicos.....	39
1.7.1. Criterio para la palabra hablada.....	39
1.7.2. CRITERIO PARA EL RUIDO EN DIVERSOS AMBIENTES.....	41
2. ENUNCIADO PROBLEMAS	45
2.1 Problema 1.....	45
2.2 Problema 2.....	45
2.3 Problema 3.....	45
3 SOLUCIONES PROBLEMAS	45
3.1 Problema 1.....	45
3.2 Problema 2.....	46
3.3 Problema 3.....	46



1. ACÚSTICA FISIOLÓGICA

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.

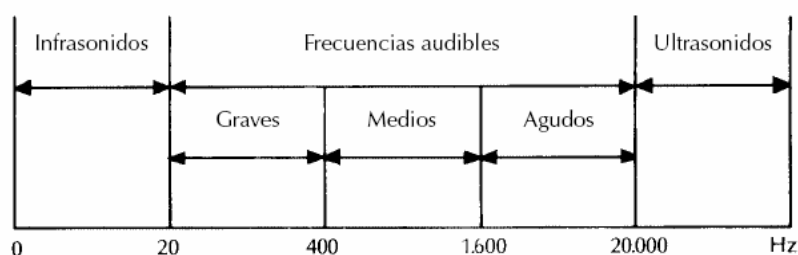


Figura 2.1 Bandas de frecuencias.

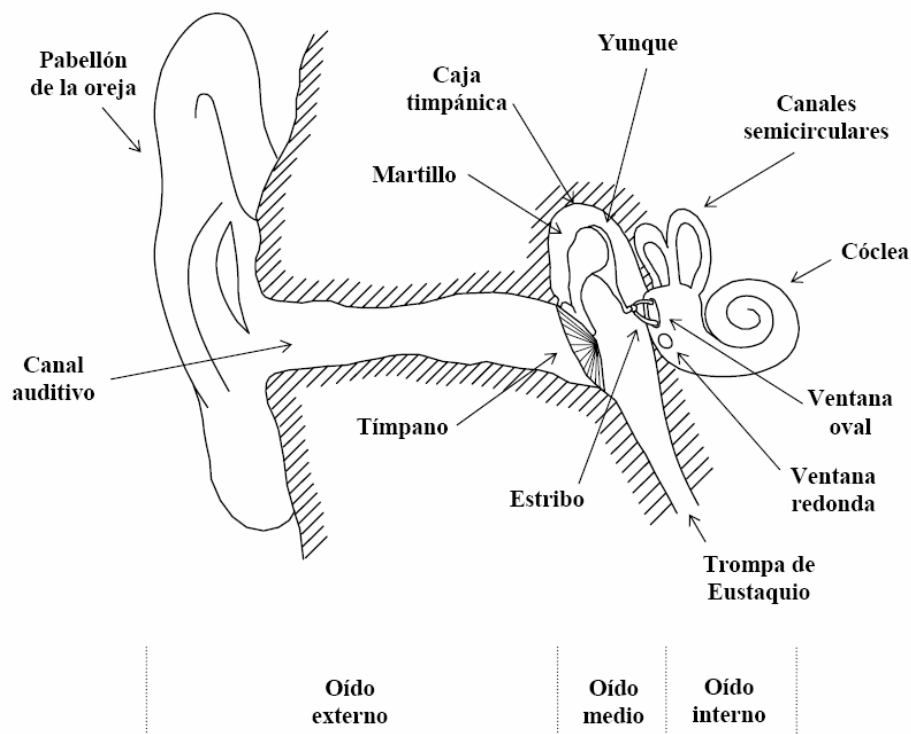


Figura 2.2. Corte transversal del oído derecho, en el cual se muestran las partes anatómicas más representativas del aparato auditivo.



El oído humano está formado, al igual que el de todos los mamíferos, por tres partes bien diferenciadas, denominadas respectivamente **oído externo**, **oído medio** y **oído interno**. A estas tres partes, que realizan respectivamente un procesamiento acústico, mecánico y eléctrico de la señal sonora se agrega el posterior procesamiento neurológico con progresivos niveles de complejidad hasta llegar a la corteza cerebral, donde se llevan a cabo los procesos intelectuales superiores como la comprensión inteligente de la palabra y la música.

El modo en que el oído percibe el sonido, es el siguiente (fig. 2.2):

- **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.

1.1.1. Oído externo

El oído externo está formado por el **pabellón u oreja** y el **canal auditivo** (figura 2.1). La oreja cumple la función de focalizar el sonido hacia el canal auditivo, produciendo un acoplamiento más efectivo entre la baja impedancia acústica del aire y la más alta del tímpano. Este acoplamiento incrementa el campo sonoro en el canal auditivo unos **5 dB** con respecto a si no existiera la oreja, especialmente alrededor de los **5,5 kHz**, que corresponde a la resonancia del pabellón. Otra función importante es la de ayudar a la localización direccional del sonido. En otros animales, la oreja está bajo control muscular voluntario o reflejo, permitiendo orientarla hasta lograr la máxima sensibilidad. En el ser humano esta función está casi completamente atrofiada, y se la sustituye por movimientos de la propia cabeza.

El canal auditivo es un tubo algo curvado que comunica la oreja con el tímpano. En promedio mide unos **7 mm** de diámetro y unos **25 mm** de longitud, y desempeña dos funciones: la de proteger al tímpano, haciéndolo virtualmente inaccesible desde afuera, y la de enfatizar por resonancia la región del espectro más importante para la inteligibilidad de la palabra. En efecto, la primera frecuencia de resonancia de un tubo semiabierto está dada por

$$f = \frac{c}{4L},$$

donde **c** es la velocidad del sonido y **L** la longitud del tubo. Para una temperatura de **36 °C**



$$f = \frac{c}{4L} = \frac{353 \text{ m/s}}{4 \cdot 0,025 \text{ m}} = 3530 \text{ Hz}.$$

Esta frecuencia concuerda muy bien con la zona más sensible del oído, de acuerdo a lo que muestran las curvas obtenidas experimentalmente por Fletcher y Munson. Cerca de la resonancia, el incremento del campo sonoro en el tímpano es de alrededor de **10 dB**.

1.1.2. Oído medio

El oído medio (figura 2.2) está formado por el **tímpano**, la **caja timpánica**, la **cadena osicular** (los **huesecillos**), una serie de músculos, como el **tensor del tímpano** y el **estapedio**, y la **trompa de Eustaquio**.

El **tímpano** es una membrana semitransparente en forma de cono achatado (con el vértice hacia adentro) que separa el canal auditivo de la caja timpánica. Su finalidad es captar las ondas sonoras que ingresan al canal auditivo y transformarlas en vibraciones mecánicas que luego serán comunicadas al oído interno. Esto sucede porque el interior de la caja timpánica contiene aire estanco y, por lo tanto, a presión constante. En el canal auditivo, en cambio la presión varía en el tiempo a causa de la onda sonora, por lo cual habrá una diferencia neta de presión que hará vibrar al tímpano alrededor de su posición de reposo.

La **cadena osicular** es un conjunto de tres diminutos huesos: el **martillo**, el **yunque**, y el **estribo**, también denominados **huesecillos**, cuya función es la de actuar como palanca entre el tímpano y el oído interno. Dicha palanca comienza con el primero de dichos huesecillos, el **martillo**, que es sometido a desplazamientos relativamente grandes pero de pequeña fuerza por la vibración del tímpano. El martillo se articula con el segundo huesecillo, el **yunque**, y éste con el tercero de ellos, el **estribo**. A causa del efecto palanca, las vibraciones del estribo son de menor amplitud pero mayor fuerza. La ganancia mecánica de esta palanca es de **1,3**, lo que significa que la fuerza que el estribo ejerce sobre la **ventana oval** es **1,3** veces mayor que ejerce el tímpano sobre el martillo. A este efecto de palanca se agrega la gran diferencia de áreas entre el tímpano (**0,6 cm²**) y la ventana oval (**0,04 cm²**), lo cual implica que la relación entre las presiones en el tímpano y en la ventana oval es

$$\frac{P_{\text{ventana oval}}}{P_{\text{tímpano}}} = \frac{1,3 \cdot 0,6}{0,04} \cong 20.$$

Esta diferencia de presiones es necesaria ya que en el tímpano existe una impedancia acústica mucho menor que en el oído interno, ya que éste último contiene agua. El conjunto actúa, por consiguiente, como un ingenioso adaptador de impedancias acústicas.

La **trompa de Eustaquio** es un conducto que comunica el oído medio con la garganta, y por consiguiente, a través de la boca, con el exterior. Normalmente está cerrada, asegurando así la estanqueidad del aire dentro del oído medio, pero al tragar o bostezar se abre, permitiendo la circulación de aire. Esto no sólo sirve como ventilación, sino que periódicamente garantiza el equilibrio entre las presiones estáticas dentro y fuera del oído medio, lo cual es necesario para evitar deformaciones del tímpano, que al operar alejado de su posición normal de reposo estaría o demasiado tenso o demasiado relajado, lo cual disminuiría su eficiencia, particularmente para los tonos agudos. De hecho, es lo que sucede al subir en un corto lapso de tiempo a un edificio muy alto o a una montaña. La presión atmosférica a gran altura es menor que a nivel del suelo, y como el proceso de ventilación del oído medio es relativamente lento, la presión dentro del oído medio sigue



siendo por un tiempo la presión normal, que es mayor que la nueva. Ello significa que el tímpano opera desplazado hacia afuera, produciendo una pérdida temporal de la respuesta a los agudos.

1.1.3. Oído interno

El oído interno (figura 2.2), también denominado **laberinto**, posee dos partes con funciones bien diferenciadas. La primera son los **canales semicirculares**, que son tres pequeños tubitos con forma de anillo de unos **6 mm** de diámetro, ubicados con sus ejes en cuadratura. Constituyen el órgano sensor del equilibrio ya que permiten detectar movimientos rotacionales. Al girar la cabeza (por ejemplo al inclinarse), dicha rotación contendrá componentes en uno o más de los ejes de los canales semicirculares. El líquido contenido en el interior de dichos canales tiende, por inercia, a mantenerse inmóvil, y eso causa un movimiento relativo entre el canal y el líquido que es detectado por unas cilios (pelos) que tapizan las paredes interiores de los canales. Esto desencadena el envío de una señal nerviosa al cerebro, quien ordenará las acciones pertinentes para recuperar el equilibrio.

La segunda parte es la **cóclea** o **caracol**, que tiene forma precisamente de caracol, y es probablemente el sistema mecánico más complejo de todo el organismo. Está destinada a transformar las vibraciones provenientes del oído medio (a través del estribo) en señales neuroeléctricas dirigidas al cerebro. La característica más sobresaliente de esta admirable pieza de ingeniería biológica es su capacidad de realizar una descomposición frecuencial del sonido, codificándolo multiparamétricamente de acuerdo a su espectro.

La cóclea, que se encuentra embutida en una cavidad de igual forma en el hueso temporal, tiene dos vueltas y media, y si pudiera desenrollarse se obtendría un conducto con forma algo cónica (el **conducto coclear**) de unos **35 mm** de longitud y un diámetro medio de unos **2 mm**. El volumen total es de alrededor de **0,05 cm³** (una gota). El conducto coclear está dividido en tres subconductos, denominados **rampas** (debido a que representan ascensos desde la base del caracol hacia su vértice): **rampa vestibular**, **rampa coclear** y **rampa timpánica**. La rampa vestibular y la rampa timpánica están llenas de **perilinf**a, un líquido acuoso rico en iones de sodio (**Na⁺**), y se comunican entre sí en el vértice o **ápex** del caracol a través de un pequeño orificio denominado **helicotrema** (extremo de la hélice o helicoides). La rampa coclear, en cambio, contiene **endolinf**a, líquido algo gelatinoso rico en iones de potasio (**K⁺**). En la **base** del caracol (espira más ancha), la rampa vestibular se comunica con el oído medio a través de la **ventana oval**, un orificio cubierto con una membrana sobre la cual se apoya el estribo, mientras que la rampa timpánica lo hace a través de la **ventana redonda**, otro orificio cubierto con otra membrana denominada **tímpano secundario** (de ahí el nombre de rampa *timpánica*).

1.2. Efectos auditivos del ruido

1.2.1. Presbiacusia y socioacusia

Se observa en general que con el transcurso de los años las personas experimentan una disminución en su capacidad auditiva, denominada **presbiacusia**. Esto se debe a dos factores: el desgaste natural de los tejidos, y la exposición a ruidos considerados normales en la sociedad. Un estudio realizado en una población muy poco ruidosa del Sudán (dado a conocer en 1962) reveló que la presbiacusia era mucho menos marcada que en ciudades como Nueva York, en las cuales se observan niveles de ruido ambiente considerablemente mayores. Por esta razón se propuso el nombre de **socioacusia** para contemplar este efecto.



Uno de los parámetros más utilizados para medir la audición es el **umbral auditivo**, que se determina con diversos procedimientos. En realidad se toma en cuenta el **desplazamiento o aumento del umbral** con relación al umbral considerado normal para cada una de las frecuencias normalizadas. Cuando el aumento del umbral es permanente o irreversible, se denomina **pérdida auditiva**. En la figura 2.3 se ha representado la pérdida auditiva en función de la frecuencia para diversas edades.

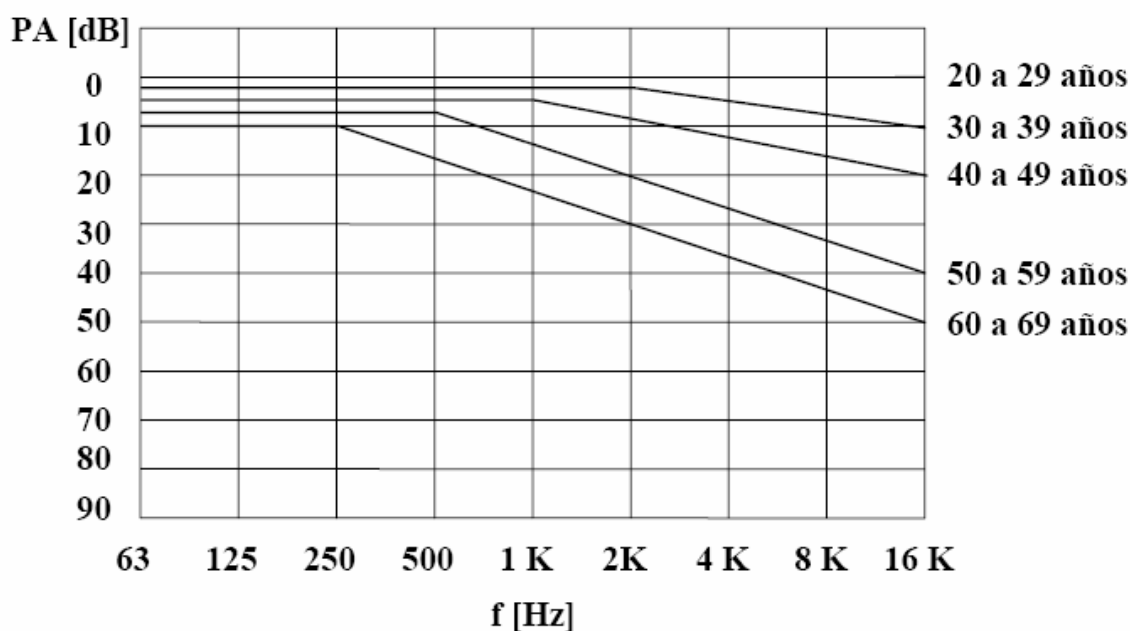


Figura 2.3. Evolución promedio de la presbiacusia, en función de la frecuencia y de la edad, según Scherzer.

1.2.2. Desplazamiento temporal del umbral

Cuando una persona está sometida a ruidos intensos durante un periodo relativamente corto de tiempo, experimenta un aumento temporario del umbral auditivo, que desaparece luego de algunas horas de descanso. Es éste el primer efecto de la exposición a ruidos de elevado nivel sonoro, y si bien suele ser reversible (salvo que el ruido sea repentino y de nivel demasiado alto, como en una explosión o un ruido impulsivo o de impacto de gran violencia), la reiteración continuada de tales exposiciones termina, a mediano plazo, ocasionando desplazamientos permanentes del umbral.

El desplazamiento temporario se produce siguiendo un crecimiento asintótico durante las primeras horas de exposición. Después de unas **8 a 16 hs** se alcanza una meseta cuya magnitud depende del nivel sonoro en **dBA**. Interrumpida la exposición, después de una inestabilidad inicial del umbral (que dura alrededor de **2 minutos**) el aumento del umbral comienza a retroceder, y lo hace en forma aproximadamente lineal con el logaritmo del tiempo hasta desaparecer. El proceso es tanto más rápido cuanto menor fue el nivel sonoro durante la exposición. Aunque no se conoce aún en



detalle el proceso del desplazamiento permanente del umbral inducido por ruido, se supone que sigue una evolución similar a la correspondiente al desplazamiento temporario.

1.2.3. Audiometría tonal

Como ejemplo estudiaremos como se realiza la audiometría mas común. La determinación del umbral auditivo es necesaria en diversas situaciones en las cuales se debe efectuar un diagnóstico del estado de la audición. Algunos ejemplos son:

- a) En los exámenes preocupacionales requeridos por la legislación de higiene y seguridad en el trabajo.
- b) En los exámenes audiológicos periódicos que establece la legislación
- c) Como información a los efectos de prescribir tratamientos médicos.
- d) Cuando se presentan querellas por hipoacusia contra un empleador.

El examen que permite determinar el umbral se denomina **audiometría**. Existen varios tipos de audiometrías, entre las cuales las más conocidas son la audiometría tonal, la audiometría por potenciales evocados, y la audiometría por otoemisiones acústicas. Nos referiremos ahora a la **audiometría tonal**. Consiste en la determinación subjetiva del umbral para tonos senoidales de frecuencias normalizadas. Las frecuencias normalmente utilizadas son: **125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz, 6000 Hz y 8000 Hz**, pudiendo en casos de audición normal realizar la medición obviando algunas de las frecuencias. En casos especiales, por el contrario, se pueden utilizar otras frecuencias. Se realiza presentando al sujeto tonos seleccionados de la lista anterior y con diversos niveles de presión sonora calibrados respecto al umbral normalizado, registrándose la **pérdida auditiva**, definida como el aumento del umbral. Este tipo de estudio *requiere la colaboración y la honestidad del paciente*, por lo cual no está indicado en el caso de niños pequeños, dementes, etc.

Existen dos formas de realizar la medición: por **vía aérea**, es decir a través del canal auditivo mediante auriculares calibrados, y por **vía ósea**, aplicando un transductor al hueso mastoides (ubicado detrás de la oreja). En la audiometría por vía aérea se investiga la totalidad del aparato auditivo, mientras que en la audiometría por vía ósea se estudia principalmente el oído interno. De la comparación entre ambas se puede determinar de qué tipo de afección se trata.

La determinación del umbral es generalmente monoaural, es decir en cada oído por separado. Dado que a través de la caja craneana existe cierta filtración del sonido presentado a un oído hacia el otro, en los casos en que existan importantes diferencias de umbral entre ambos oídos podría suceder que el paciente crea escuchar el sonido con el oído excitado, cuando realmente lo escucha con el otro por vía ósea. Por esta razón se acostumbra enmascarar el oído no excitado con un ruido de banda estrecha (del orden de una banda crítica) alrededor de la frecuencia investigada. En la figura 2.4. se muestra una audiometría tonal sobre la carta habitualmente empleada para su presentación.

Existe una serie de marcas y colores normalizados para indicar los puntos sobre la gráfica, que dependen de qué tipo de excitación (aérea u ósea) se utilice y en qué oído se realice el estudio. Las marcas más frecuentes son las que se indican a continuación, correspondiendo el color rojo al oído derecho y el azul al izquierdo:

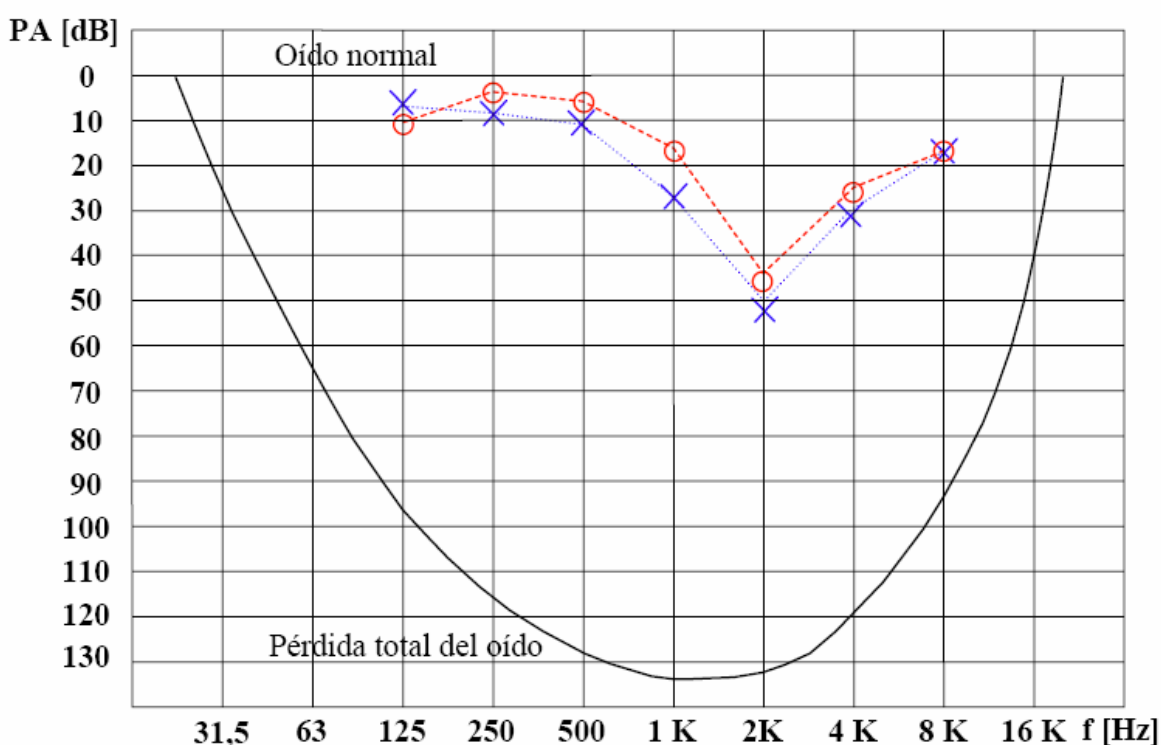


Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

- Oído derecho, vía aérea
- × Oído izquierdo, vía aérea
- < Oído derecho, vía ósea
- > Oído izquierdo, vía ósea

En las audiometrías también se suele dejar constancia de las frecuencias de los **acúfenos** o **tinnitus**, es decir los zumbidos o silbidos permanentes de los oídos, lo cual se determina por comparación con sonidos de prueba presentados por el examinador.



- Oído derecho
- × Oído izquierdo

Figura 2.4. Ejemplo de audiometría tonal, en el que se muestra el resultado de un estudio por vía aérea en ambos oídos. La demarcación con círculos y cruces es de uso estándar. En el eje vertical se indica la **pérdida auditiva**. Se incluye la curva considerada como de pérdida total del oído. La recta de **0 dB** corresponde a audición normal.



1.2.4. Logaudiometría

Los diferentes tipos de audiometrías permiten evaluar el funcionamiento del aparato auditivo propiamente dicho, incluidas las vías nerviosas que conducen hacia la corteza cerebral. La **logaudiometría** es un estudio complementario orientado a evaluar la audición desde el punto de vista funcional de la *comprensión oral*. Para realizarla se leen **25** palabras fonéticamente balanceadas, vale decir con igual distribución de los diversos fonemas (igual número de apariciones de cada uno) a distintos niveles de presión sonora, y se registra el porcentaje de aciertos para cada nivel de presión sonora. Dicho porcentaje se denomina **valor de articulación**, y se registra en un gráfico como el indicado en la figura 2.5. En personas con audición normal, por encima de los **40 dB** el valor de articulación debería ser del **100 %**. La logaudiometría no contempla la presencia de ruidos que pudieran enmascarar la palabra.

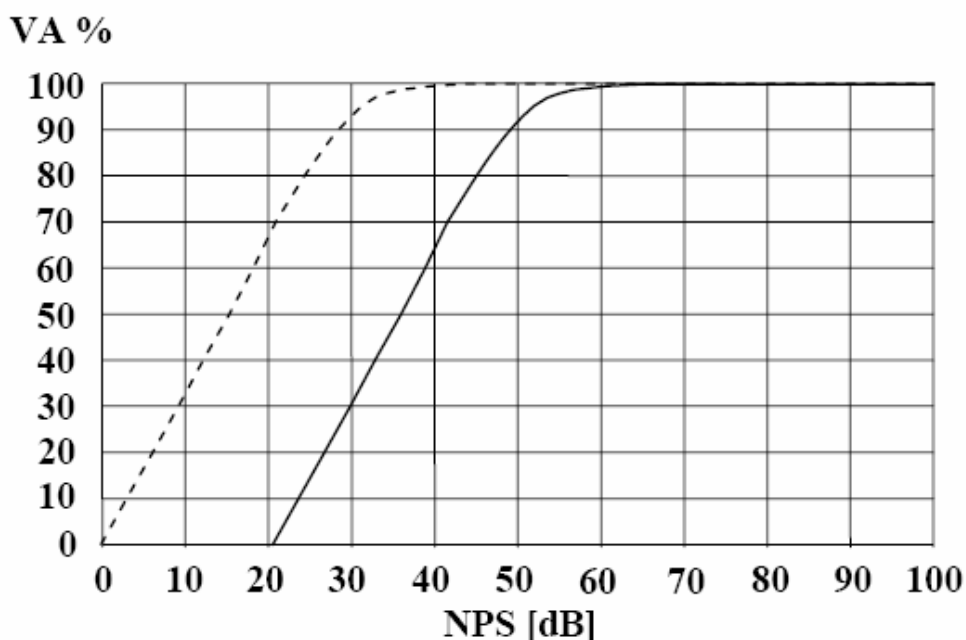


Figura 2.5. Ejemplo de logaudiometría para audición normal. Según se observa, por encima de los **40 dB** se logra un **100 %** de aciertos.

La logaudiometría es una herramienta muy útil para el diagnóstico, dado que su aspecto revela fácilmente el tipo de afección auditiva, aunque obviamente no dice nada respecto al umbral auditivo.



1.2.5. Hipoacusia conductiva

La **hipoacusia**, es decir la disminución de la capacidad auditiva, puede ser de dos tipos básicos: **conductiva** y **perceptiva**, según que la causa sea una deficiencia en la *conducción* del sonido hasta el oído interno, o una disfunción de la *cóclea* o la *vía nerviosa*, respectivamente.

La hipoacusia conductiva puede deberse a obstrucciones del canal auditivo causadas por algún objeto, cuerpo extraño o tapón de cerumen, o bien por lesión o destrucción del tímpano, o por el endurecimiento o pérdida de funcionalidad de los huesecillos, o por supuración del oído medio a causa de alguna infección otorrinolaringológica (otitis media). Se caracteriza por una audiometría aérea anormal y ósea normal, como se muestra en la figura 2.6, ya que la audición por vía ósea esencialmente no depende del aparato conductivo, accediendo directamente a la cóclea. La logaudiometría, por su parte, presenta un corrimiento hacia niveles de presión sonora más elevados, pero siempre se alcanza un nivel para el cual el valor de articulación (porcentaje de aciertos) alcanza el **100 %** (figura 2.7).

En general los problemas conductivos son reversibles. Las obstrucciones del canal auditivo se resuelven con una simple limpieza de oído, removiendo los elementos obstructivos o disolviendo con agua tibia el tapón de cerumen. El tímpano se reconstruye o cicatriza naturalmente, y en casos severos puede repararse quirúrgicamente (timpanoplastia). Las supuraciones de oído medio se corrigen con tratamientos adecuados hasta la recesión de la infección. Por último, los inconvenientes con la cadena osicular admiten también corrección por la vía quirúrgica, siendo posible el reemplazo de los huesecillos por prótesis.

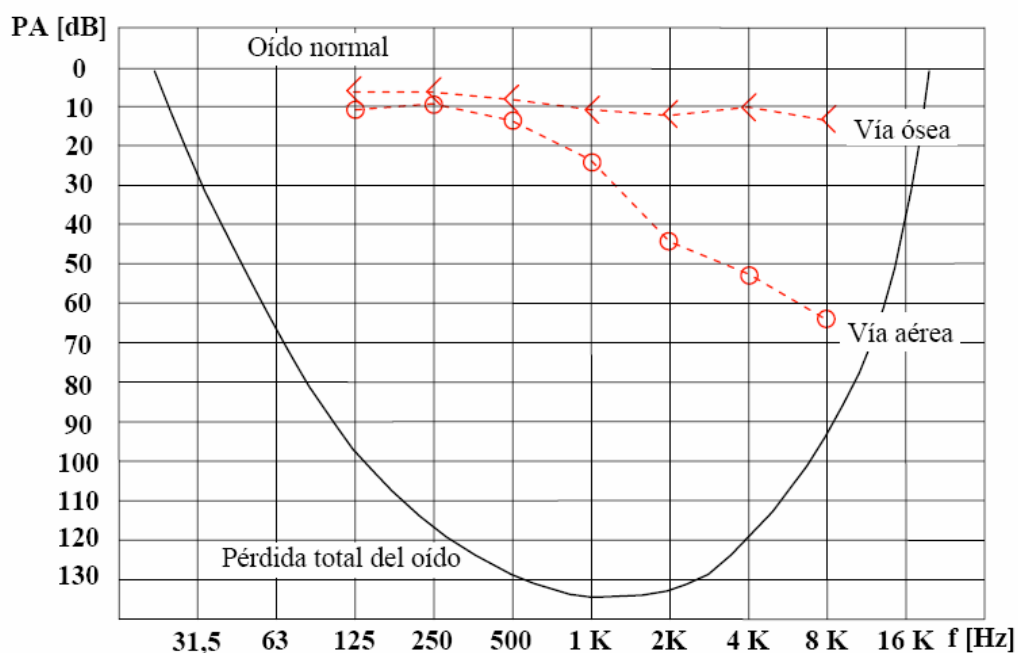


Figura 2.6. Ejemplo de audiometría tonal correspondiente a una **hipoacusia conductiva**. La curva correspondiente a excitación por vía aérea acusa pérdida auditiva, debida a alguna obstrucción o



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

disfunción del aparato conductivo (oído externo y medio), mientras que la curva obtenida por vía ósea es normal.

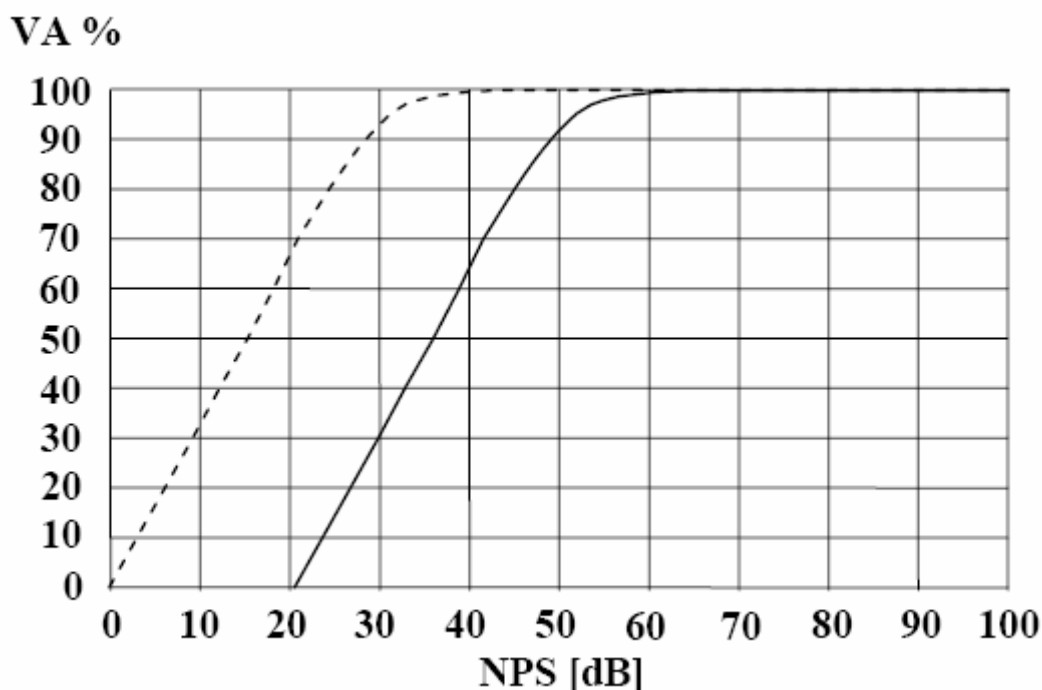


Figura 2.7. Ejemplo de logaudiometría correspondiente a una **hipoacusia conductiva**. Como referencia se ha incluido la curva normal en línea de trazos.

1.2.6. Hipoacusia perceptiva

La hipoacusia perceptiva puede deberse a una lesión de la cóclea (**lesión coclear**) o a una lesión del nervio coclear (**lesión retrococlear**). En este caso hay coincidencia entre las audiometrías por vía aérea y ósea (siempre y cuando no exista concurrentemente una hipoacusia conductiva), como se muestra en la figura 2.8. Con respecto a la logaudiometría, en el caso de lesión retrococlear (del nervio), al aumentar el nivel de presión sonora se alcanza una meseta con un porcentaje de aciertos inferior al **100 %** que aún con un ulterior aumento del nivel de presión sonora no puede ser mejorado. En el caso de la lesión coclear, el problema se agrava, dado que el valor de articulación alcanza un máximo hacia los **70 dB** u **80 dB** y luego se reduce, lo cual restringe notablemente el rango de sonoridades para el cual se logra una relativa inteligibilidad de la palabra (figura 2.9).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

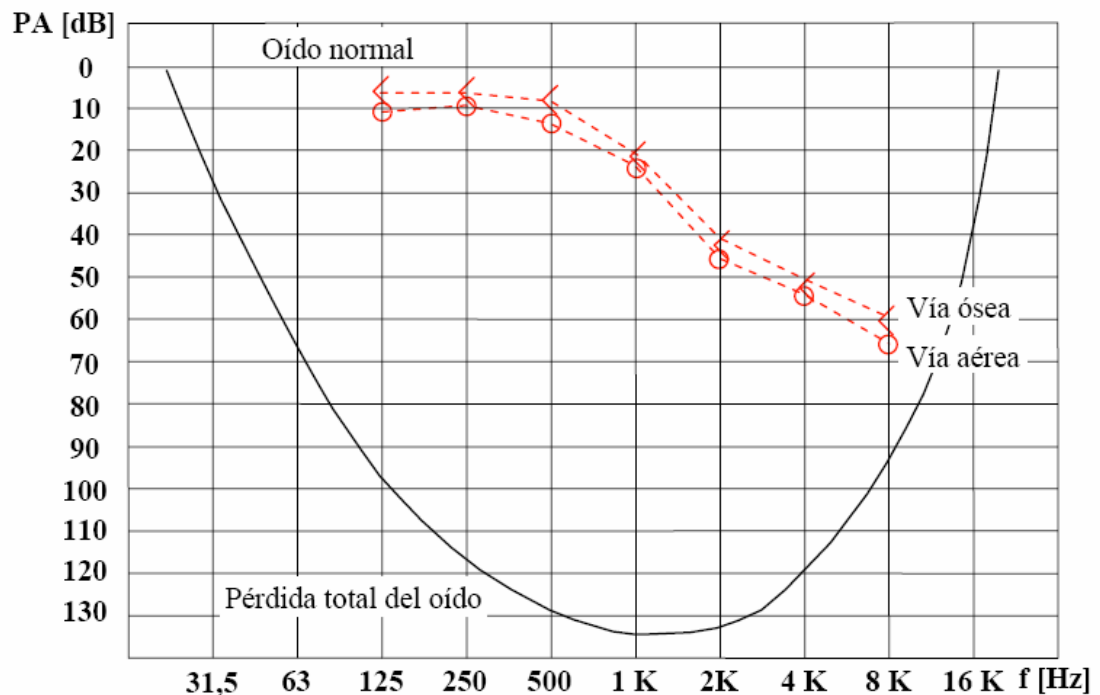


Figura 2.8. Ejemplo de audiometría tonal correspondiente a una **hipoacusia perceptiva**. Las curvas correspondientes a excitación por vía aérea y ósea presentan una pérdida auditiva similar.

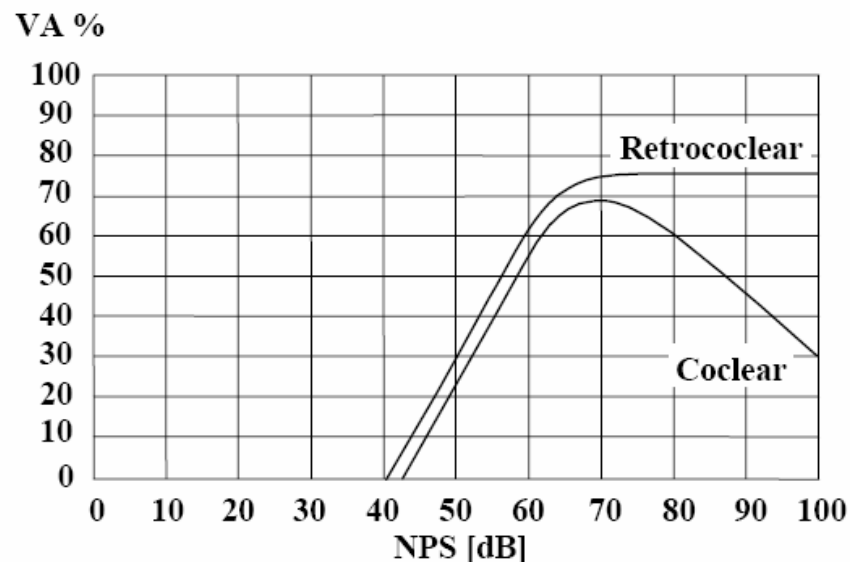


Figura 2.9. Ejemplo de logaudiometría correspondiente a una **hipoacusia perceptiva**. Como referencia se ha incluido la curva normal en línea de trazos.



A diferencia de la hipoacusia conductiva, las hipoacusias de origen coclear y retrococlear son en general irreversibles. En los casos de hipoacusia coclear profunda pero con el nervio auditivo en buenas condiciones, existe hoy en día la posibilidad de implantar quirúrgicamente un tipo de prótesis denominado genéricamente **implante coclear**, que sustituye rudimentariamente al órgano de Corti. Dicho implante coclear consiste en una serie de electrodos distribuidos a lo largo de la cóclea, comandados exteriormente (a través del hueso mastoides) por acoplamiento magnético. La excitación que se aplica al nervio auditivo por estos electrodos es el resultado de una descomposición en frecuencias semejante a la que se verifica en una cóclea normal, realizada en este caso por un procesador electrónico sobre la señal acústica.

El resultado de esta intervención, como puede comprenderse fácilmente, es muy limitado, ya que se reemplazan alrededor de **25.000** células ciliadas por un número muy inferior de electrodos (por ejemplo, **22** electrodos). A pesar de ello, con un entrenamiento y rehabilitación meticolosos, puede recuperarse parcialmente la comunicación oral. Es de esperar que esta técnica vaya mejorando progresivamente, de modo de brindar una solución más completa a la sordera coclear.

1.2.7. Pérdida auditiva e inteligibilidad de la palabra

Si bien cualquier incremento permanente del umbral de audición constituye algún deterioro de la capacidad auditiva, se considera que produce **incapacidad** recién *cuando dicho deterioro es suficiente para afectar la comunicación oral*. La definición se basa en el hecho de que la inteligibilidad de la palabra es la situación que ofrece mayores exigencias al aparato auditivo. Por ejemplo, es posible que una persona comprenda y disfrute muy bien la música, y en cambio tenga serias dificultades para entender la palabra. Esto se debe a las características acústicas muy particulares de la señal sonora correspondiente a la palabra, que podrían resumirse en lo siguiente:

- Los **fonemas** (mínimo fragmento con identidad fonética propia) que constituyen el lenguaje hablado se dividen en **vocales** y **consonantes**.
- Las consonantes confieren mayor cantidad de información que las vocales.
- Las vocales constituyen sonidos cuasi periódicos, y por lo tanto poseen un espectro discreto constituido por una fundamental y sus armónicos. Las consonantes, en cambio, por lo general tienen un espectro predominantemente continuo.
- Las vocales tienen su energía principalmente en baja frecuencia. Las consonantes, en alta frecuencia.
- Las vocales son más intensas que las consonantes.
- Las vocales tienen una duración mayor que las consonantes.

De estas características se deduce que las consonantes, que son la parte más significativa de la palabra, son más débiles, más cortas, y tienen una identidad espectral menos definida que las vocales. Si a esto se agrega el hecho de que las hipoacusias comienzan afectando la respuesta en alta frecuencia del oído, que es la región del espectro donde aparecen las consonantes, se concluye que la inteligibilidad de la palabra se ve seriamente afectada en cualquier proceso de hipoacusia.

Es posible establecer una relación cualicuantitativa entre la pérdida auditiva y la incapacidad para comprender la palabra. Para ello se introduce la **pérdida auditiva promedio, PAP**, definida como el promedio aritmético entre las pérdidas en las frecuencias **500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz**:



$$PAP = \frac{PA_{500} + PA_{1000} + PA_{2000}}{3}$$

Se verifica entonces lo indicado en la tabla 2.1. Según se puede apreciar, para pérdidas promedio menores que **25 dB** la inteligibilidad de la palabra no se ve comprometida, y entonces se considera que para valores de **PAP** inferiores a **25 dB** no hay incapacidad. En Audiología, se considera **normal** una audiometría que no supera los **20 dB** de pérdida auditiva.

TABLA 2.1. Relación entre la pérdida auditiva promedio y la incapacidad para la comprensión de la palabra.

Pérdida auditiva promedio	Descripción del grado de incapacidad
$PAP \leq 25$	Sin dificultades para la voz suave
$25 < PAP \leq 40$	Dificultades sólo para la voz suave
$40 < PAP \leq 55$	Dificultad frecuente para la voz normal
$55 < PAP \leq 70$	Dificultad frecuente para la voz alta
$70 < PAP \leq 90$	Sólo comprende el grito o la voz amplificada
$90 < PAP$	Normalmente no comprende ni la voz amplificada

1.2.8. Hipoacusia profesional

Se denomina **hipoacusia profesional** o **profesoacusia** a la pérdida auditiva *permanente* o *irreversible* causada por la exposición prolongada (generalmente durante años) a niveles de ruido excesivos en ambientes laborales, es decir durante varias horas por día. No debe confundirse esto con el **trauma acústico**, que es la pérdida repentina de la audición a causa de una exposición accidental a ruidos excepcionalmente fuertes, como explosiones, disparos, etc. sin la debida protección auditiva. La hipoacusia profesional tiene una evolución con el tiempo bastante característica, tal como se muestra en la figura 2.10. Dentro de los primeros dos años de exposición se produce un ligero aumento del umbral en la banda entre **3 kHz** y **6 kHz**. Dicho incremento no es significativo para la comprensión oral, porque las frecuencias más importantes para la palabra están por debajo de los **3 kHz**. Por este motivo la incipiente hipoacusia suele pasar desapercibida, más aún teniendo en cuenta la gran adaptabilidad del ser humano, que lo lleva a acostumbrarse sin inconvenientes a cambios graduales como éstos. Hacia los **10** años de exposición ya se ha producido un significativo aumento del umbral en **4 kHz**, denominado **escotoma** (un pico de **30 dB**), y la lesión comienza a manifestarse también en frecuencias más bajas. Después de unos **20** años el escotoma



se profundiza, afectándose la banda de los **2 kHz**, aunque aún sin una pérdida significativa para la palabra. Después de eso el escotoma se profundiza aún más y luego de unos **35 años**, se tiene una pérdida auditiva de alrededor de **50 dB** en toda la banda de **2 kHz a 4 kHz**, lo cual constituye una incapacidad considerable para la inteligibilidad del habla.

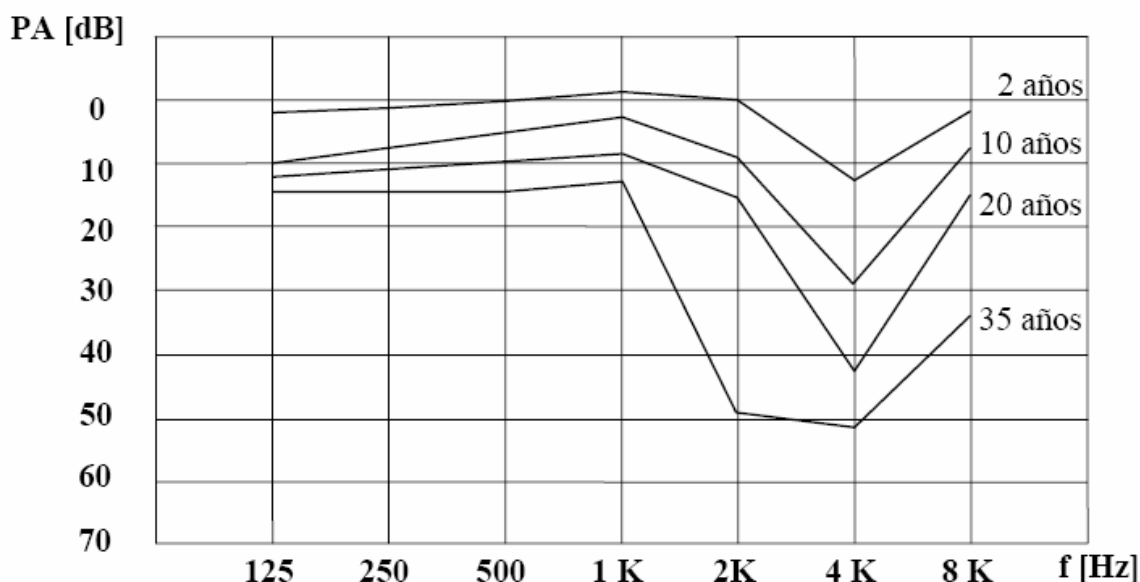


Figura 2.10. Evolución de una **hipoacusia profesional**.

Comienza afectando las altas frecuencias y luego se propaga y profundiza hacia las frecuencias esenciales para la comprensión de la palabra.

La evolución descrita concuerda bastante bien con la evolución del desplazamiento temporal del umbral, lo cual puede utilizarse para evaluar preventivamente la posible evolución de una hipoacusia irreversible. La causa de la hipoacusia de origen laboral está en la lesión crónica de regiones desprotegidas del órgano de Corti, que a falta del necesario periodo de recuperación se va profundizando hasta la destrucción definitiva de las células.

Es interesante observar que las zonas más desprotegidas son aquellas que corresponden a las frecuencias de mayor sensibilidad del oído, y por ello no sorprende la aparición de un escotoma en dicha región. Los ruidos de baja frecuencia son por lo tanto menos dañinos que los de alta frecuencia. También debe observarse que los ruidos tonales resultan más perjudiciales que los ruidos de banda más ancha, ya que concentran toda su energía en regiones específicas del órgano de Corti, afectando de un modo muy intenso unas pocas células ciliadas. Los ruidos cuyo espectro está más distribuido, en cambio, reparten su energía entre muchas más células, con lo cual cada célula recibe una dosis menor.

Por último, cabe notar que los ruidos de carácter impulsivo y por lo tanto de muy corta duración son potencialmente muy peligrosos, ya que pueden ser muy intensos y sin embargo evocar una sensación de sonoridad mucho menor. Ello se debe a que la sensación de sonoridad demora algunos cientos de **ms** antes de manifestarse en toda su dimensión, debido a que la percepción de la intensidad experimenta un mayor retardo que la de la frecuencia. El resultado puede ser que ante la reiteración de los impulsos, se produzca muy rápidamente daño auditivo sin que el sujeto expuesto advierta el peligro.



1.2.9. Determinación del riesgo auditivo

El **riesgo auditivo** que conlleva la exposición a determinado nivel de ruido de origen laboral durante un tiempo dado se define como *el porcentaje de las personas expuestas que adquieren algún grado de incapacidad auditiva menos el porcentaje de las personas **no** expuestas que adquieren el mismo grado de incapacidad*. Se toma esta diferencia para eliminar los casos de presbiacusia y conservar sólo aquellos atribuibles exclusivamente a la exposición al ruido. El grado de incapacidad que se adopta habitualmente es el que corresponde a las primeras dificultades para la comprensión de la palabra, esto es, una pérdida auditiva promedio (**PAP**, ecuación 2.6) de **25 dB**.

En la tabla 2.2 se indican los porcentajes de personas no expuestas a ruidos importantes que adquieren incapacidad de acuerdo al criterio anterior, en función de la edad, es decir, la distribución estadística de *presbiacúsicos*.

TABLA 2.2. Porcentaje de personas con presbiacusia en función de la edad.

Edad	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
%	1	2	3	5	7	10	14	21	33	50

La Organización Internacional de Normalización (ISO, International Organization for Standardization) ha emitido la norma ISO 1999, que da el riesgo auditivo en función del nivel sonoro continuo equivalente en **dBA** (unidad definida en el capítulo 4 que contempla los diferentes efectos de las frecuencias altas y bajas), y los años de exposición, como se indica en la tabla 2.3 (correspondiente a la primera edición, de 1975). El nivel sonoro continuo equivalente (definido más formalmente en los capítulos 3 y 4) es el nivel sonoro de un ruido constante a lo largo de la jornada laboral de **8 horas** que tiene la misma energía que el ruido fluctuante real. A los efectos de calcular el riesgo de acuerdo con la definición dada, se considera que la vida laboral comienza a los **20 años** de edad.

Nivel Sonoro Continuo Equivalente [dBA]	Años de exposición								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0
85	1	3	5	6	7	8	9	10	7
90	4	10	14	16	16	18	20	21	15
95	7	17	24	28	29	31	32	29	33
100	12	29	37	42	43	44	44	41	35
105	18	42	53	58	60	62	61	54	41
110	26	55	71	78	78	77	72	62	45
115	36	71	83	87	84	81	75	64	47

TABLA 2.3. Riesgo porcentual en función del nivel sonoro y de los años de exposición.



La tabla muestra que cuando el nivel de ruido es inferior a los **80 dBA** el porcentaje de personas afectadas más allá de lo atribuible a la presbiacusia no es significativo. Por otra parte, la Agencia de Protección Ambiental (**EPA**, Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos, ha concluido que una exposición permanente (**24 horas** diarias) a un nivel de ruido de **70 dBA** o bien una exposición de carácter laboral (**8 horas** diarias) a **75 dBA** aseguran que un **96 %** de la población no sufrirá mayores daños auditivos que los correspondientes a la presbiacusia.

EJEMPLO 2.1.

Una empresa en la cual trabajan **3000** empleados tiene la política de cambiar las funciones de aquellos empleados para los cuales las condiciones de trabajo potencialmente pueden causarles alguna incapacidad. Suponiendo que el servicio médico de la compañía esté en condiciones de detectar en un lapso relativamente corto (digamos **6 a 12 meses**) a aquellos empleados susceptibles de sufrir deterioro auditivo, y teniendo en cuenta que un **5 %** trabaja en la sala de turbinas, con un nivel de ruido de **90 dBA**, un **75 %** lo hace en la planta de producción, con **85 dBA**, y el resto desempeña funciones administrativas en ambientes relativamente silenciosos, determinar la cantidad de empleados que deberán ser transferidos a otras funciones. Suponer que el tiempo de permanencia promedio en la empresa es de **25 años**.

Solución: De la tabla 2.3 se obtiene que un **16 %** de las personas que trabajan expuestas a **90 dBA** y un **7 %** de las expuestas a **85 dBA** sufrirán incapacidad auditiva. Entonces cabe esperar que

$$3.000 \times 0,05 \times 0,16 + 3.000 \times 0,75 \times 0,07 = 182$$

empleados experimenten daño auditivo de permanecer en las funciones actuales. Por consiguiente, **182** empleados deberían ser transferidos a otras actividades. Esta cantidad representa una parte importante (un **6 %**) del personal de la compañía, lo cual puede hacer imposible dicho traslado. La solución consistirá entonces en aplicar técnicas de control de ruido para mejorar el ambiente laboral, o establecer la obligatoriedad de utilizar protección auditiva permanente.

1.3 Parámetros objetivos y subjetivos de la audición

1.3.1 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.

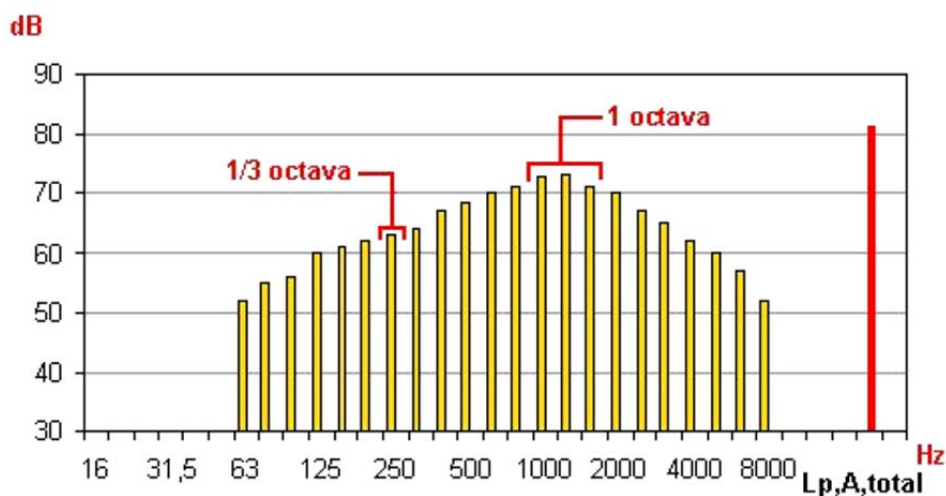


Figura 2.11. Espectro de sonido por bandas de 1/3 y de octava.

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

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



1.3.2 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.

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: $P_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ μbar , presión acústica del umbral auditivo

L = Nivel sonoro en dB

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

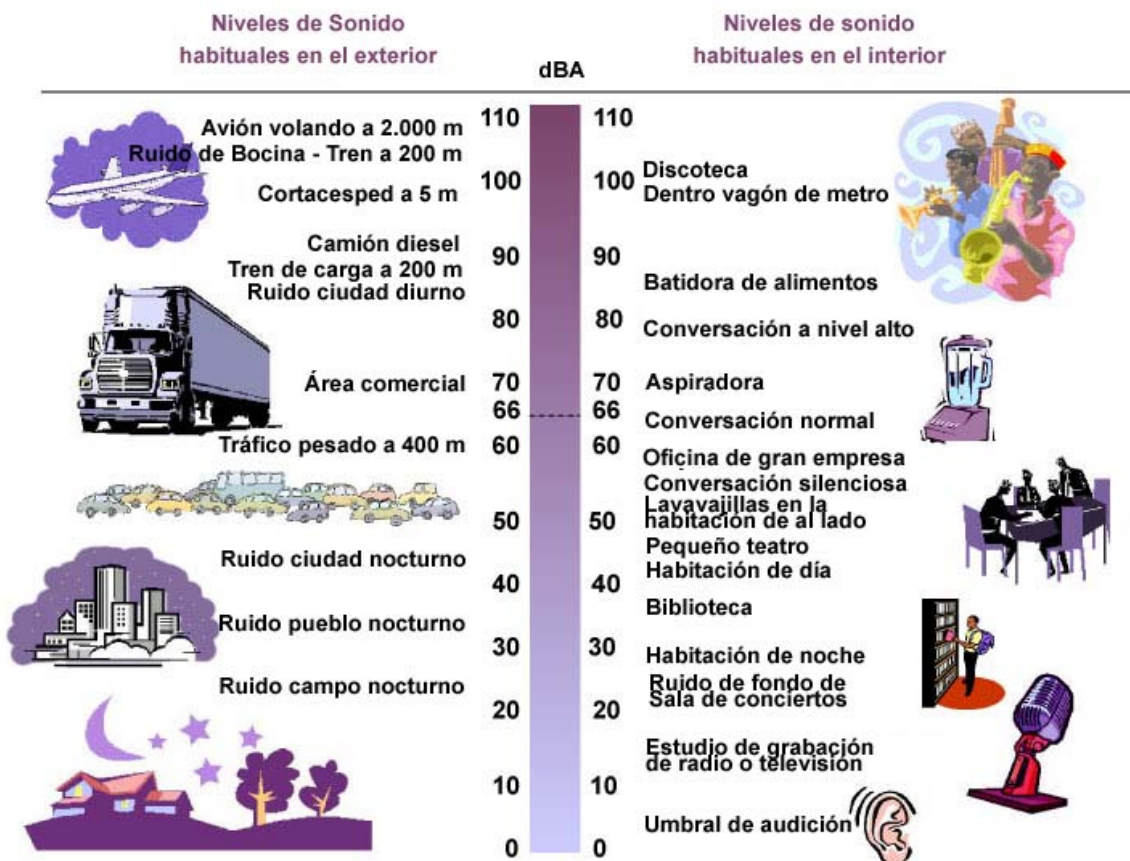
Por otra parte, como las intensidades sonoras son proporcionales al cuadrado de las presiones, la fórmula anterior puede escribirse:

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

Siendo $I_0 = 10^{-12}$ 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.



1.3.3 Sonoridad

Sensibilidad auditiva

Como dijimos en el apartado anterior, el oído humano no es igual de sensible a todas las frecuencias. Primero Fletcher y Munson (1933), aunque seguidamente Robinson y Dadson (1956) con mayor precisión 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. 2.12).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

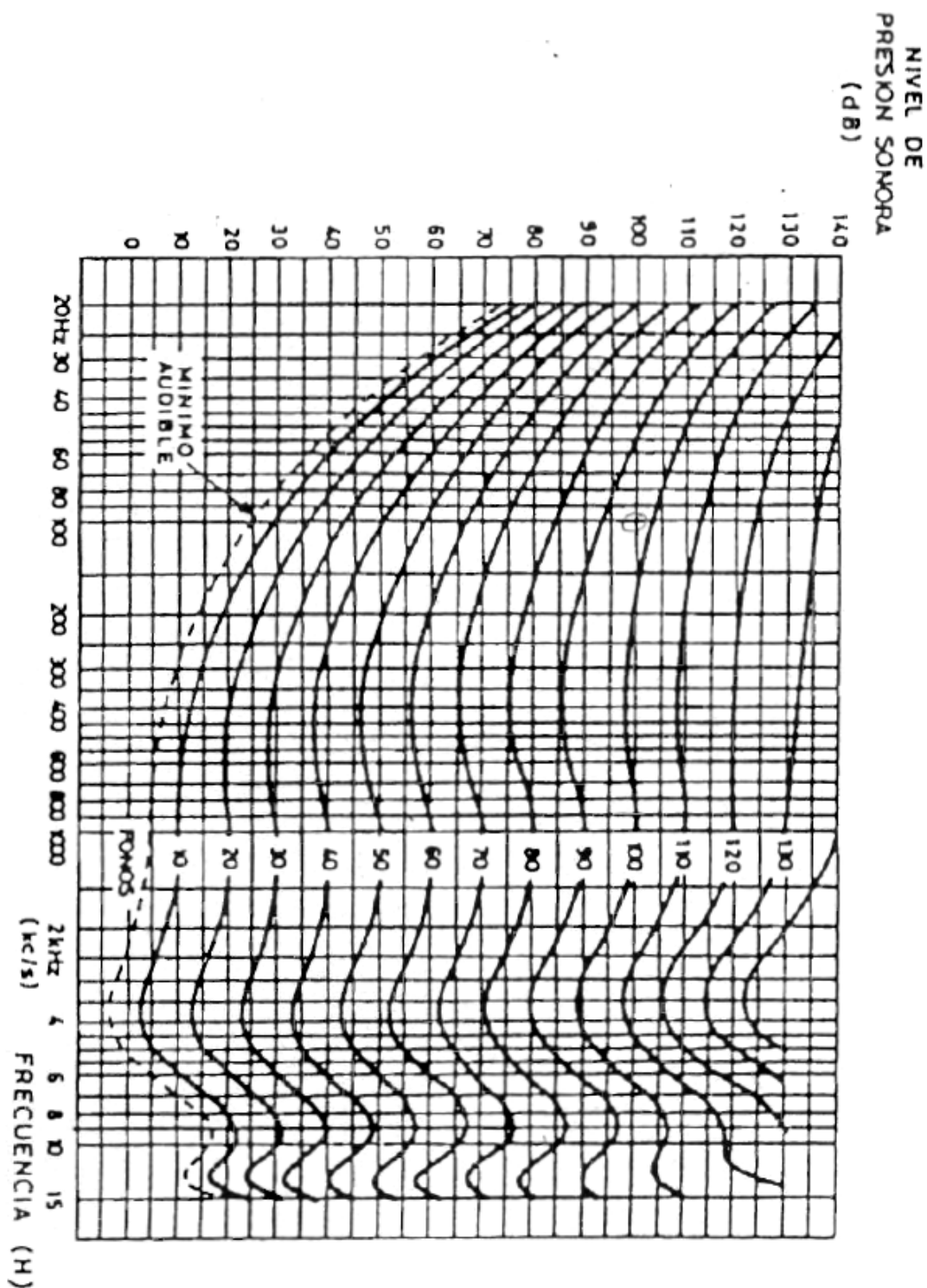


Figura 2.12. Curvas de igual nivel sonoro expresadas en decibelios con relación a 10^{-12} W/m^2 (recomendación ISO R 226).



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 **nivel de sonoridad**, expresado en **fon**, en la magnitud psicoacústica **sonoridad**, cuya unidad es el **son**, como se muestra en la figura 2.13.

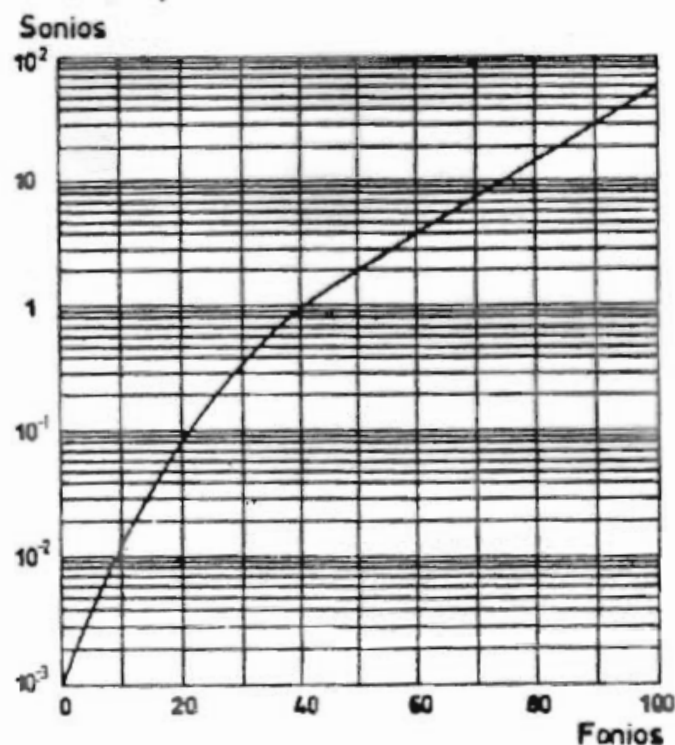


Figura 2.13. Relación entre sonoridad (son) y nivel de sonoridad (fon). La curva, dibujada en un diagrama semilogarítmico es aproximadamente lineal por encima de los 40 fon.



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.

$$S = 2^{\frac{NS - 40}{10}} \text{ para } NS > 40 \text{ fonios}$$

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

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 2.12.*
- 2) *Con la gráfica de la Fig 2.13, 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 2.14 dB(A).

1.3.4 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.

1.3.5 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.

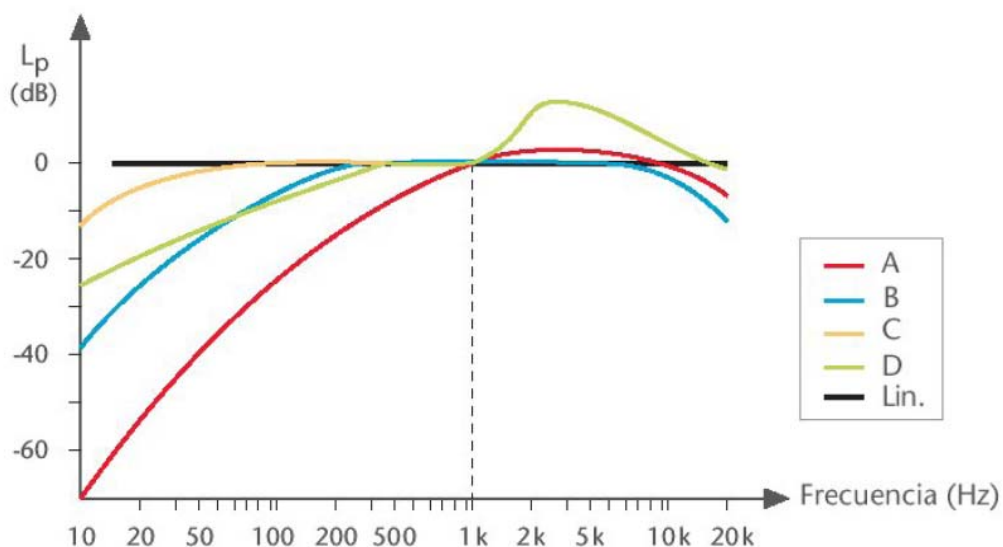


Figura 2.14. Curvas de ponderación.

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

1.3.6 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.

1.4 El mecanismo de la voz.

1.4.1 Composición del órgano de la voz

El órgano de la voz incluye los pulmones, la laringe y la boca, realizando una función determinada cada una de estas partes, exponiéndose seguidamente su mecanismo. Por contracción de los músculos del tórax se expulsa el aire de los pulmones, que genera un exceso de presión, dando origen a una corriente de aire, pudiendo considerarla como portadora de energía que estuviese modulada en su velocidad, y por consiguiente en presión, para la producción de sonidos, realizando la modulación para dos tipos distintos de sonidos, vocales y consonantes. Esta corriente de aire pasa a través de la glotis, que es un espacio situado en la base de la laringe, siendo el primer elemento modulador, formando membrana cercana a la laringe, constituyendo sus membranas un diafragma que al abrirse y cerrarse modula la corriente de aire que pasa por ella. La longitud de esta abertura es de unos 2,5 cm para el hombre y de 1,5 cm para la mujer, estando determinada la frecuencia fundamental de esta modulación por la tensión a la que están sometidas las cuerdas vocales. La parte frontal de cada pliegue vocal está unido al cartílago del tiroides o a la nuez.

Los pliegues vocales no sirven para producir sonidos, sino que su función es proteger los pulmones de las partículas que se arrastran al inspirar el aire. Encima de los pliegues vocales existen unos falsos pliegues, que entran en acción cuando se llenan los pulmones con una cantidad de aire superior a la normal. Los pliegues vocales están situados en la parte superior de la laringe, que es una cavidad que une la boca con el esófago. La parte superior de la faringe es el velo del paladar o paladar blando que comunica con la cavidad nasal.

Cuando el velo del paladar está en su posición más alta, el paso a la nariz se cierra y el aire circula a través de la boca. La laringe, faringe y la boca constituyen el aparato vocal formado por numerosas cavidades resonantes y orificios, configurando una red que modula la onda de presión.

La voz, como instrumento sonoro, está determinada por las posiciones de los labios, la mandíbula, la lengua y la laringe. Los movimientos de estos elementos cierran o dilatan el aparato vocal según las posiciones, lo que permite producir una gran variedad de sonidos vocales. También se pueden producir sin emplear las cuerdas vocales, denominándose sonidos respiratorios, pudiéndose incluir en este grupo a las consonantes fricativas (F y S). En este caso, la señal se produce por modulación de la corriente de aire mediante los labios, dientes y lengua.

De acuerdo con lo expuesto el órgano de la voz, como generador de la misma, se puede dividir en tres grandes unidades que son, (figura 2.15):

- a) Los pulmones que aportan la energía.
- b) Los pliegues vocales que funcionan como oscilador.
- c) El aparato vocal que es una caja de resonancia.

El aire al entrar o salir, produce sonidos que pueden ser articulados, cuando su intensidad está regulada por el volumen de aire expelido, así como el tono, por la tensión a la que se someten las cuerdas vocales. Cuando éstas no intervienen los sonidos producidos se llaman inarticulados.

La voz puede originarse con la intervención de otros órganos diferentes a los mencionados anteriormente como por ejemplo el vientre, aunque éste es un mecanismo muy especial. El



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

mecanismo de producción de vocales y consonantes es diferente, ya que en el primer caso el aire que pasa por la laringe es modulado por las cuerdas vocales, mientras que en el segundo intervienen además los labios, cavidades, lengua, etc.

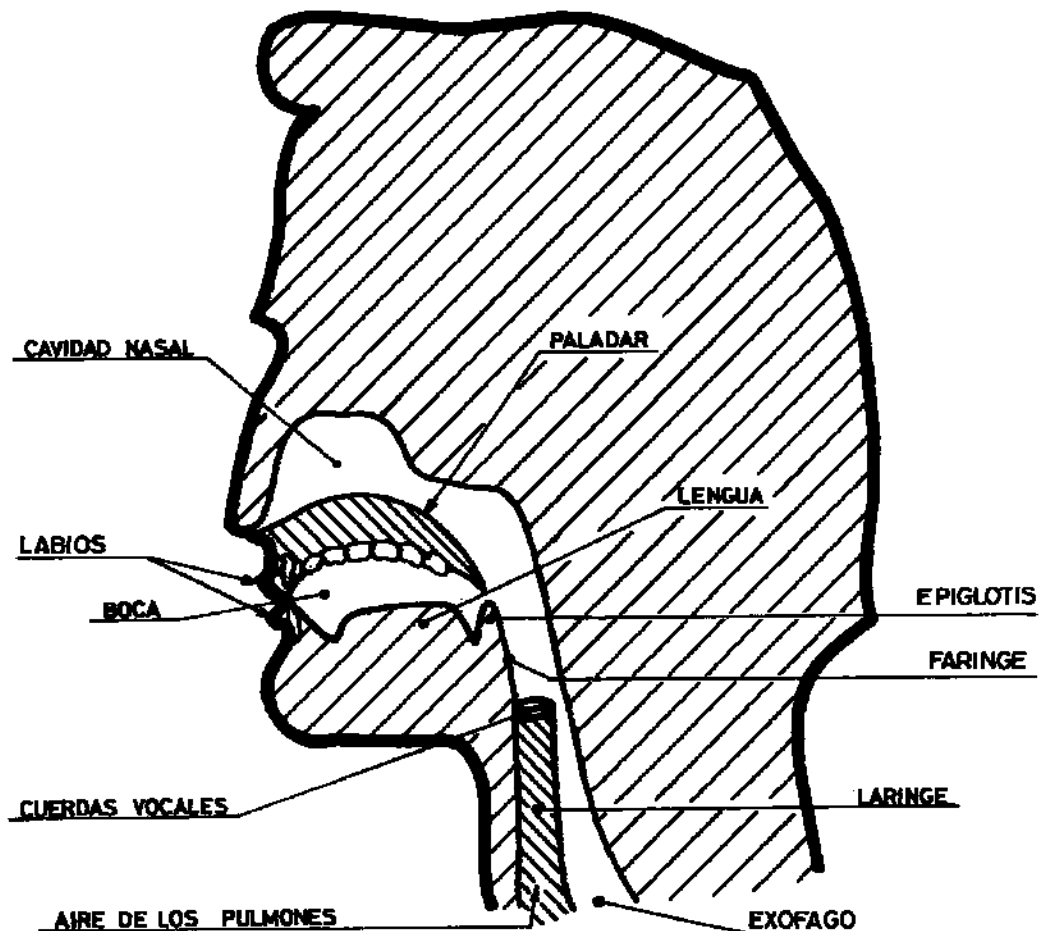


Figura 2.15. Órgano de la voz.

Resumiendo lo expuesto anteriormente, con la glotis cerrada y una corriente de aire saliendo de los pulmones, se crea un exceso de presión debajo de la glotis que mantiene los pliegues vocales separados, pasando el aire entre los mismos, y generando una fuerza tipo Bernoulli que junto con las propiedades mecánicas de los pliegues cierra casi inmediatamente la glotis.

La presión diferencial actúa nuevamente y fuerza a los pliegues vocales a separarse. En el ciclo de abrirse y cerrarse, los pliegues actúan alimentando una corriente de aire que penetra dentro del aparato vocal. La frecuencia de vibración está determinada por la presión de aire en los pulmones, así como por las propiedades mecánicas de los pliegues vocales, que están regulados por un gran número de músculos laríngeos. Generalmente, cuanto mayor es la presión de los pulmones y más estrechos y tensos los pliegues vocales, mayor es la frecuencia de su vibración, así como la del aire que penetra. El sistema vibratorio produce una rápida oscilación de la presión de aire en el aparato vocal, generando un sonido, cuya fuerza es una manifestación de la frecuencia vibratoria.



1.4.2 Características acústicas.

Hay personas cuya voz puede escucharse en grandes locales, como es el caso de los cantantes de ópera, mientras que otros no tienen esa capacidad. Debemos preguntarnos que permite estas diferencias.

Tratemos de explicar seguidamente este fenómeno, basándonos en las características físicas de la voz. El sonido engendrado por la corriente de aire y roto por las vibraciones de los pliegues vocales se llama "manantial de voz", que es la materia prima de conversaciones, discursos, canciones, etc. La voz es una señal compleja, compuesta por la frecuencia vibratoria de los pliegues vocales y por un gran número de armónicos de frecuencia superior, cuya amplitud disminuye uniformemente al ritmo de 12 dB/octava.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el aparato vocal es un conjunto de resonadores, de tal manera, que cuando existe coincidencia entre la frecuencia de un resonador y la de un sonido, éste se atenúa menos que otros sonidos que no presentan esa coincidencia emitiéndose con más fuerza que cuando no hay coincidencia. El aparato vocal tiene 4 o 5 resonancias importantes llamadas "formantes". Cuando la señal de la voz tiene una frecuencia próxima o coincidente con la de algún formante, mayor es su amplitud al abrir los labios. La presencia de los formantes, rompe la uniformidad de la envoltura del espectro del manantial de la voz, esta perturbación origina distintos sonidos. Las frecuencias de los formantes aparecen en el espectro como máximos en la envoltura, que son característicos de sonidos particulares.

Las frecuencias de los formantes se determinan por la forma del aparato vocal, que se podría considerar como un cilindro perfecto cerrado en la glotis, abierto por los labios y con una longitud de unos 17,5 cm. Cada formante está asociado con una onda de distinta duración, pudiendo considerarla como una onda de presión cuya amplitud tiene un máximo cerca del final de la glotis, y un mínimo en los labios abiertos. El formante más bajo corresponde a una longitud de $\lambda/4$ dentro del aparato vocal. De forma análoga, el segundo, tercero o cuarto formante, corresponden respectivamente a longitudes de $3\lambda/4$, $5\lambda/4$ y $7\lambda/4$.

Cualquier cambio en la sección transversal del aparato vocal altera las frecuencias del formante individual, dependiendo la dirección de la modificación del lugar donde se origine a lo largo de la onda. El cierre del aparato vocal en un lugar donde la situación de la onda de un formante presenta unas oscilaciones con una amplitud de presión mínima, provoca la caída en frecuencia del formante, mientras que la expansión del aparato en estos mismos lugares eleva la frecuencia.

El aparato vocal se cierra y se abre de muchas formas, en general bastante complicadas, al cerrarse en un determinado lugar afecta a la frecuencia de todos los formantes en distintos aspectos. Existen sin embargo tres elementos que pueden alterar la forma del aparato, de tal manera que la frecuencia de un formante va dirigida en una dirección especial. Estos tres elementos son la mandíbula, la lengua y la punta de la lengua. El movimiento de la mandíbula, que puede cerrar el aparato vocal hacia el final de la glotis y dilatarlo hacia el final de los labios, es decisivo, sobre todo para la frecuencia del primer formante, que es más alta cuando la mandíbula está abierta.

El segundo formante, depende de la forma de la lengua, mientras que el tercero lo hace de la posición de la punta de la lengua. El movimiento de los diferentes órganos de articulación en varias direcciones, cambia la frecuencia de los dos formantes más bajos, que en la media de los adultos va de 250 a 700 Hz, para el primer formante y de 700 a 2.500 Hz para el segundo. Al hablar y cantar, se mueven los órganos de articulación actuando sobre los formantes para cambiar sus frecuencias. Cada elemento de articulación corresponde a un adelanto en las frecuencias del formante, que se asocia con un sonido de distinta vocal.



En el caso de los cantantes, con relación a las personas que no cantan se dice que tienen la voz más "oscura". En la formación existen dos tipos de fuentes que generan respectivamente señales periódicas y aleatorias. La oratoria de las cuatro posibles combinaciones de estos dos sistemas de excitación, es decir, señales periódicas, aleatorias, combinación de las dos señales y ausencia de las mismas.

Según distintos trabajos, la diferencia más importante entre el lenguaje en hombres y mujeres, es la duración de las pausas. Para un orador determinado la frecuencia media laríngea, medida en condiciones idénticas, varía muy poco de una grabación a otra. Experimentando durante mucho tiempo, con un gran número de individuos, se ha comprobado que la frecuencia media laríngea es una característica individual, situándose los resultados entre 110 y 133 Hz para los hombres, mientras que para las mujeres está comprendida entre 188 y 229 Hz. Las características fisiológicas que intervienen en la formación de los sonidos, nos dan la frecuencia fundamental (tono), así como los armónicos que la acompañan (timbre), lo que permite identificar a cada persona. Teniendo en cuenta el timbre, la voz del hombre de una forma aproximada se extiende en una banda de 100 a 8.000 Hz, mientras que la de la mujer va de 200 a 9.000 Hz.

En la tabla 2.5 se presentan las bandas que cubren la voz a los cantantes clásicos, como vemos la zona de graves está cubierta por el hombre y la de agudos por la mujer.

TABLA 2.5. Rango en frecuencia de diferentes voces cantadas.

Instrumentos	Límite inferior		Límite superior		Timbre
	Nota musical	Frecuencia (Hz)	Nota musical	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (KHz)
Soprano	DO ₃	261,62	DO ₅	1.046,50	-
Mezzosoprano	LA ₂	220,00	LA ₄	879,98	-
Contralto	FA ₂	174,61	MI ₄	659,25	-
Tenor	RE ₂	146,68	DO ₄	523,25	-
Barítono	SI ₁	123,47	LA ₃	440,00	-
Bajo	MI ₄	82,40	RE ₃	293,66	-
Voz femenina	-	164,80	-	9.399,00	-
Voz masculina	-	98,00	-	8.372,00	-

Con relación a las letras y a su espectro en frecuencias, la letra "s" es la que mayor componentes de agudos tiene, por ejemplo si se suprimen las frecuencias superiores a 6.000 Hz, la letra no se entiende, lo mismo sucede con la "j" si se suprimen frecuencias por encima de 4.600 Hz. Al



llegar a los 2.000 Hz, la mayoría de las consonantes apenas se entienden, la "r" es la que mejor se comprende aun suprimiendo frecuencias por encima de 1.500 Hz. Por debajo de los 500 Hz todas las vocales se confunden con la "u". Por tanto, la letra "s" es la de frecuencia más elevada y la "u" la de frecuencia más baja.

Por consiguiente, si se desea reproducir fielmente la voz deberán reproducirse las frecuencias de 60 a 10.000 Hz siendo esenciales de 200 a 6.000 Hz.

La energía de la voz es más intensa a las bajas frecuencias, y si se tiene en cuenta que el oído tiene una peor sensibilidad para los graves, se observa el condicionamiento mutuo entre los órganos de emisión y recepción (nivel de ruido ambiental, características del local, etc.). Por ejemplo, a unos 200 Hz el oído tiene una sensibilidad muy pobre siendo la energía de la voz máxima

La gama de frecuencias que abarca un idioma es muy variable, lo que es importante para determinar las características de micrófonos y altavoces que deben trabajar en el mismo. Por otro lado, la intensidad media también varía según el idioma.

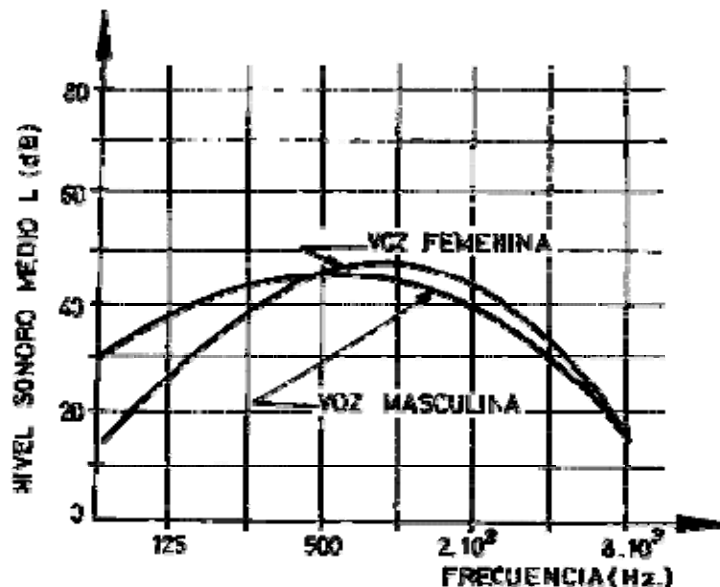


Figura 2.16. Distribución con la frecuencia del nivel de potencia sonora media, emitida por un hombre o una mujer hablando en tono normal.

La potencia de la voz es muy variable, ya que está condicionada por factores ante los que reacciona de una forma inconsciente, subiendo o bajando el volumen de emisión. Cada persona tiene unas características propias, por lo que sólo se puede hablar en términos generales.

En una simple frase, el registro de las distintas intensidades sonoras, presenta valores muy diferentes, por lo que al dar una medida tiene que referirse a valores medios. Se deben tener en cuenta las pausas, que son los períodos de silencio, que pueden llegar a alcanzar el 50% del tiempo empleado en hablar.

La potencia media de la palabra emitida por una persona a nivel de conversación, es de unos 10 microvatios, medida en un intervalo de tiempo de 2 o 4 segundos. Cuando se habla elevando la



voz todo lo posible, sin forzar las cuerdas vocales, la potencia media de la palabra es de unos 1.000 microvatios, mientras que a nivel de susurro es de 0,001 microvatios.

En la tabla 2.6 se pueden ver algunos niveles de presión sonora de la voz. En locales de grabación sonora la presión no es un problema, siendo importante la calidad y disciplina de la voz.

TABLA 2.6. Rango dinámico de diferentes voces.

Tipo de fuente sonora	Nivel presión sonora en dB
Nivel susurro	20
Hombre en conversación tranquila	30
Mujer en conversación tranquila	25
Hombre en conversación normal	55
Mujer en conversación normal	50
Hombre hablando en público sin esforzarse	65
Mujer hablando en público sin esforzarse	60
Hombre hablando en público esforzándose	75
Mujer hablando en público esforzándose	70
Hombre gritando	85
Mujer gritando	80
Cantante profesional	80
Potencia máxima	90

La distribución de potencia de la palabra con la frecuencia tanto para la voz masculina como para la femenina, obtenida por procedimientos experimentales, se puede ver en la figura 11.2. La integral total del nivel de presión en la banda de frecuencias de 100 a 10.000 Hz oscila entre 65 y 75 dB, para una gran número de personas hablando en condiciones normales, siendo el nivel total medio con un nivel de ruido ambiental normal de 66 dB. Con relación al nivel de potencia, a nivel de conversación puede ser de 70 dB, a nivel de murmullo de 30 dB y a nivel fuerte de 80 a 90 dB.

En la señal vocal debe tenerse muy en cuenta que la forma de la onda es muy irregular, con un factor de pico muy elevado, es decir, que los picos de presión son elevados frente a la presión eficaz dentro de un intervalo de tiempo grande.

En la Norma Española NBE-CA-88 en su Anexo 2 "Condiciones del medio" indica que los niveles sonoros medios que produce la conversación se cifran en 70 dB(A), y en los casos en que se fuerza la voz 76 dB(A), alcanzándose los 100 dB(A) en el caso de los gritos.



Como vemos la potencia de la voz es muy variable, estando muy influenciada por el tipo de local en el que se va a hablar, con sus características de aislamiento y acondicionamiento acústico (teatros, salas de conferencias, teatros de ópera, etc), por ejemplo en el caso de los estudios de grabación sonora, podemos considerar que las personas que hablan (locutores) tienen la voz educada, amplificándose la misma por procedimientos electrónicos de acuerdo con las necesidades.

La voz como fuente sonora, tiene unas características direccionales de tal manera que la direccionalidad aumenta a medida que crece la frecuencia de la señal producida. Para bajas frecuencias (aproximadamente 100 Hz) la característica es omnidireccional, a medida que aumenta la frecuencia, la voz se va haciendo cada vez más direccional, no existiendo prácticamente propagación por la espalda a partir de una frecuencia de 4.000 Hz (figura 2.17).

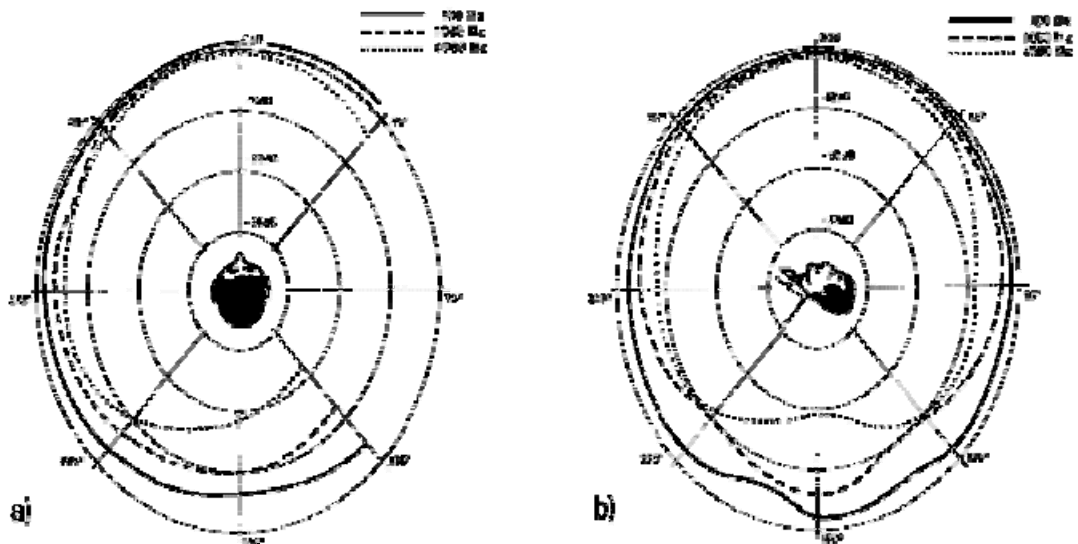


Figura 2.17. Diagrama de directividad de la voz humana a tres frecuencias: a) en un plano horizontal a través de la boca; b) en un plano vertical simétrico y bilateral a través de la boca..

Si se desea efectuar una grabación sonora de la voz, queda claro que es importante conocer sus características, (intensidad, tono, timbre y direccionalidad), ya que los dispositivos electroacústicos (micrófonos, altavoces, amplificadores, etc) están condicionados por las características anteriormente mencionadas. Por consiguiente, la elección de los dispositivos adecuados tiene una gran importancia para lograr una correcta grabación o reproducción sonora, a partir del conocimiento de las magnitudes y características de la fuente sonora que se desea grabar.

1.5. Interferencia en la palabra



Uno de los efectos no clínicos más conspicuos del ruido es la interferencia a la palabra, es decir la dificultad para mantener una conversación en presencia de ruido. Hemos visto que el aumento del umbral auditivo debido a una hipoacusia reducía la capacidad de comprender la palabra hablada. El problema que ahora nos ocupa es esencialmente similar a aquél, sólo que en este caso el aumento del umbral no se debe a una hipoacusia sino al enmascaramiento producido por el ruido.

El reconocimiento de la palabra emitida es un aspecto importante en un sistema de transmisión sonora, que puede ser simplemente el aire en un espacio abierto, o el aire en un espacio cerrado como es un local, entre el que habla y el que escucha, o puede ser también un sistema reproductor del sonido, como la televisión, radio, teléfono, equipos reproductores, etc.

Si se conocen tanto las características de la voz como las del recinto donde se habla, se puede encontrar el valor del nivel de presión sonora existente, con el fin de poder seguir una conversación en tono normal cuando el nivel de ruido ambiental permite la inteligibilidad de la conversación. Si el nivel de ruido es elevado, para hacerse entender es indispensable alzar la voz.

En los estudios de grabación sonora, tiene una gran importancia la comprensión de las palabras, así como la identificación de la persona que habla y las sensaciones que desea transmitir a partir del tono de su voz.

Existe un procedimiento para estudiar la transmisión y recepción de una señal a través de un sistema de comunicación vocal, y es el denominado "inteligibilidad" entendiendo por tal el número de palabras, frases o párrafos con significado, entendidos del número total de los pronunciados, al realizar una serie de pruebas normalizadas con un grupo de personas en un laboratorio. También se suele emplear otra prueba denominada "articulación" que es el número de sonidos vocales individuales entendidos del total de los pronunciados. Las pruebas de inteligibilidad son más fáciles, dando unos resultados mayores que los de articulación, ya que hacen intervenir la inteligencia de los oyentes.

1.5.1. Tests de articulación

Los **tests de articulación** son pruebas orientadas a determinar el grado de inteligibilidad que tendrá la palabra en un medio acústico ruidoso. Se pueden hacer con sílabas sin significado, con palabras, o con frases. El procedimiento del test es similar al utilizado en una logaudiometría: se lee cierta cantidad de sílabas, palabras o frases según corresponda, con dicción clara y con un nivel sonoro conocido y aproximadamente constante, en presencia del ruido cuyo efecto se quiere evaluar. Se obtiene el **índice porcentual de articulación**, definido como el porcentaje de aciertos sobre intentos por parte de varios escuchas con buena audición. Se utilizan sílabas, palabras o frases acústicamente balanceadas.

Existen varios índices, según la extensión del material fonético utilizado: el **índice porcentual de articulación silábica**, **IPAS**, el **índice porcentual de articulación de palabras**, **IPAP**, y el **índice porcentual de articulación de frases**, **IPAF**. Una característica interesante de estos tests es que la articulación de palabras es siempre mayor que la articulación de sílabas aisladas, y la de articulación de frases mayor que la de palabras. Ello se debe a que el cerebro se basa en el contexto para reconstruir la información perdida. Por ejemplo, no todas las combinaciones de sílabas son palabras, lo cual permite descartar ciertas combinaciones antojadizas. También contribuyen la acentuación (virtualmente inexistente en las sílabas sueltas) y la entonación. En las frases, la organización gramatical así como la coherencia del mensaje transmitido permiten incrementar aún más la cantidad de aciertos. En la figura 2.18 se muestra el índice porcentual de articulación silábica en función del nivel de presión sonora, en ausencia de ruido, mientras que en la figura 2.19 se da la relación entre el índice porcentual de articulación silábica y el índice porcentual de articulación de palabras.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Finalmente, en la figura 2.20 se muestra la relación entre los índices porcentuales de articulación de palabras y de frases.

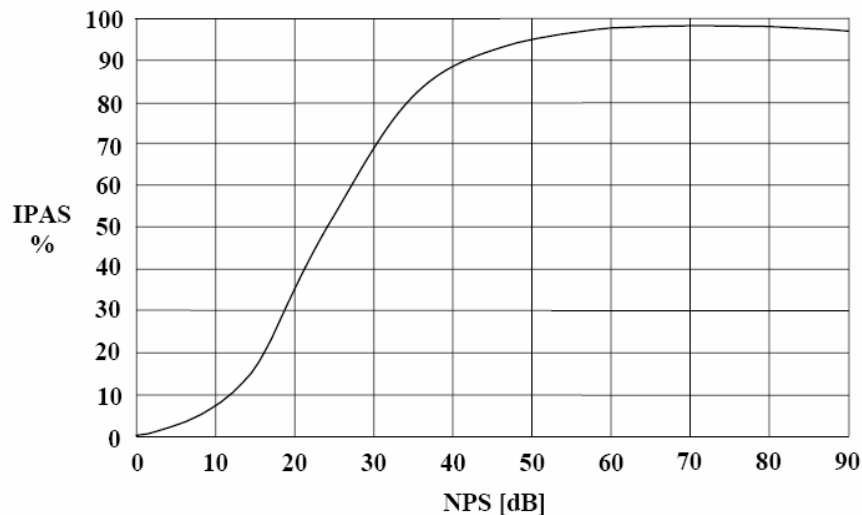


Figura 2.18. Índice porcentual de articulación silábica en función del nivel de presión sonora de la voz, en ausencia de ruido.

Para la realización del test conviene utilizar personal entrenado, tanto para la escucha como para la locución. Habitualmente los miembros del plantel se entrenan en condiciones ambientales silenciosas, y con conjuntos de sílabas, palabras o frases similares pero no iguales a las que luego se utilizarán. El entrenamiento se prolonga hasta que en condiciones óptimas de escucha no existe ulterior mejora en el índice porcentual de articulación.

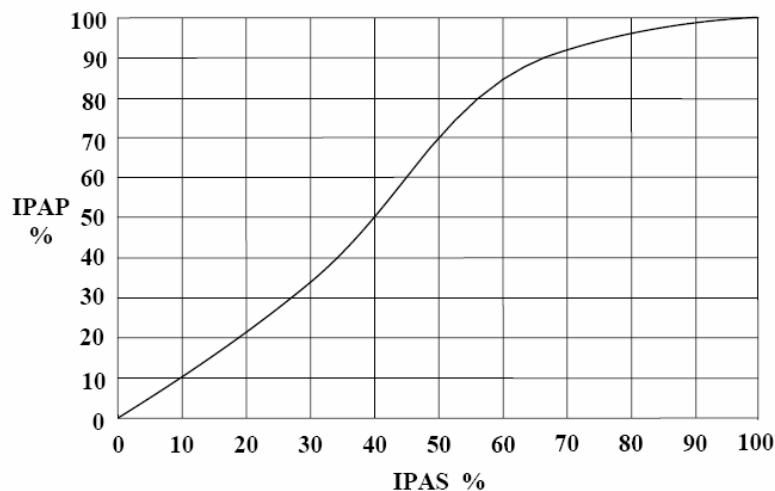


Figura 2.19. Índice porcentual de articulación de palabras en función del índice porcentual de articulación silábica.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

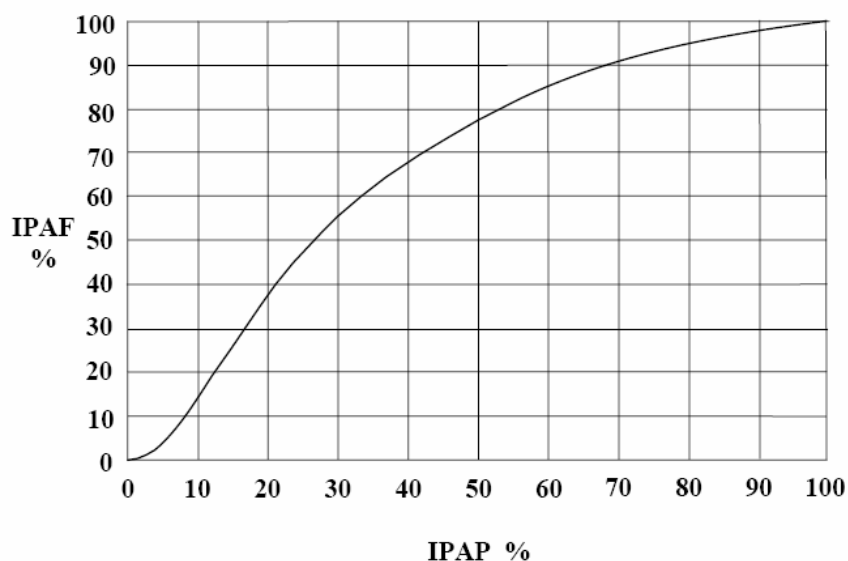


Figura 2.20. Índice porcentual de articulación de frases en función del índice porcentual de articulación palabras.

La siguiente es una lista de sílabas sin sentido fonéticamente balanceadas, es decir en la cual los distintos fonemas se presentan con igual frecuencia:

AZ	AX	EB	EG	EP	AM	AT	EF	UK	OK
ON	UR	EG	UF	OJ	UK	EK	IM	OK	UP
EG	EB	EG	IJ	OL	IL	OR	AG	EK	AT
UM	OF	AJ	OZ	AF	EZ	ID	AL	EP	EX
OG	IJ	IR	IP	IK	OX	AN	UT	UR	ET



1.6. Efectos no auditivos del ruido

1.6.1. Efectos sobre la voz

El ruido intenso tiene un efecto indirecto sobre la voz, debido al **reflejo cócleorrecurrente**, que consiste en que si una persona está hablando, ante un aumento del nivel sonoro ambiental tenderá a “subir” la voz. Subir la voz implica una doble acción: aumentar la potencia sonora emitida y aumentar la frecuencia.

En grupos laborales que requieren del uso de la voz estando expuestos a ruidos, como por ejemplo los docentes escolares (en especial los de enseñanza primaria), se encuentran frecuentemente alteraciones o disfunciones crónicas del aparato fonatorio, debidos al efecto mencionado anteriormente, que conduce a un esfuerzo excesivo del aparato vocal.

También en los ambientes educativos se ha observado que el ruido ocasiona problemas de aprendizaje. El rendimiento escolar de dos grupos de alumnos de similares características difiere considerablemente cuando uno de ellos asiste a clase en un aula que da a un patio interior mientras el otro lo hace en un salón a la calle, expuesto al ruido del tránsito. Observaciones similares se han hecho en zonas próximas a aeropuertos, debido en este caso al ruido de los aviones despegando y aterrizando.

1.6.2. Otros efectos clínicos

Se han descrito numerosos efectos clínicos no auditivos del ruido. Entre ellos pueden citarse la hipertensión arterial pasajera, las taquicardias, las cefaleas, el nerviosismo, el estrés, la reducción del rendimiento físico y la pérdida de la concentración y de la atención. También hay variaciones del ritmo respiratorio, disminución de la secreción salival y del tiempo de tránsito intestinal.

En relación con la eficiencia en el trabajo, se observa que la misma se reduce ante un ruido repentino o inusual, pero al volverse éste repetitivo el individuo se acostumbra y recupera la eficiencia. Esto es especialmente cierto para el caso de los trabajos manuales o que no requieren una gran elaboración intelectual. Las tareas intelectuales se ven más afectadas por el ruido que las físicas.

A partir de estudios epidemiológicos se han comprobado incrementos significativos en la incidencia de accidentes cardiovasculares, neurológicos, digestivos y endócrinos, los cuales llegan a ser hasta 4 veces más frecuentes en la población expuesta a ruidos muy intensos, como sucede en los alrededores de los aeropuertos. Según los especialistas, esto podría deberse a que las vías nerviosas colaterales a la vía nerviosa auditiva podrían verse afectadas cuando la señal neurológica es muy intensa, influyendo presumiblemente en varios aspectos de diversas funciones fisiológicas no auditivas.

El ruido incide de dos formas sobre los canales semicirculares. Primero, porque en el **vestíbulo**, es decir la zona que comunica los canales semicirculares con la cóclea, existen vibraciones fluidas que afectan las células sensorias de dichos canales, y segundo porque las vías nerviosas de dichos canales y del órgano de Corti están muy próximas espacialmente.

Es bien sabido que el ruido muy intenso provoca insomnio, pero aún cuando el nivel sea suficientemente bajo como para no ocasionar la vigilia, se producen efectos perniciosos sobre las etapas del sueño profundo. Esto es especialmente perjudicial en los niños pequeños, ya que la



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

hormona del crecimiento se segrega especialmente durante el sueño profundo, por lo cual también se ve afectado el crecimiento y desarrollo.

1.6.3. Efectos psicológicos

Por último, el ruido produce también simplemente molestia, lo cual no está en relación directa con el nivel sonoro ni con su frecuencia ni con su contenido espectral. Por ejemplo, una gota de agua que se desprende cada unos pocos segundos no es especialmente intensa, ni tiene un espectro particularmente molesto, y sin embargo es capaz de afectar a muchas personas, especialmente al intentar conciliar el sueño o concentrarse en actividades intelectuales, por cierto mucho más que millones de gotas de lluvia, aunque el nivel en este caso sea mucho más alto. Los ruidos con contenido semántico (por ejemplo la música o la palabra), en muchos casos provocan mayor interferencia y molestia que otros ruidos de espectro y nivel similares, aunque en esto existe una gran variabilidad individual. No existen hasta el momento criterios ampliamente difundidos que puedan tener en cuenta estos efectos.

1.7. Algunos criterios psicoacústicos

Existen varios criterios destinados a evaluar el efecto del ruido sobre diversas actividades desde el punto de vista del bienestar. Son, desde luego, más exigentes que los criterios de riesgo. Comentaremos dos de estos criterios, pertinentes en particular a la inteligibilidad de la palabra hablada y al nivel de ruido admisible para diversos tipos de ambientes.

1.7.1. Criterio para la palabra hablada

El criterio de evaluación utiliza el **Nivel de Interferencia a la Palabra (SIL)**, definido como el promedio aritmético de los niveles de presión sonora del ruido interferente en las bandas de octava de **500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz**, es decir

$$SIL = \frac{NPS_{500} + NPS_{1000} + NPS_{2000} + NPS_{4000}}{4}$$

Este parámetro se utiliza en combinación con la gráfica de la figura 2.21. En dicha gráfica se establece el máximo nivel de interferencia a la palabra en función de la distancia para diversos grados de esfuerzo vocal, desde la voz suave hasta la máxima emisión posible. El criterio presupone un índice de articulación silábico del **85 %**, que garantiza un índice de articulación de palabras del **97 %**. La zona sombreada corresponde a rangos de distancias típicas que dos personas tienden a mantener naturalmente ante diversos valores del **SIL**. Las gráficas indicadas en la figura corresponden a voces femeninas o mixtas. Para voces masculinas solas las rectas se elevan en unos **4 dB**.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

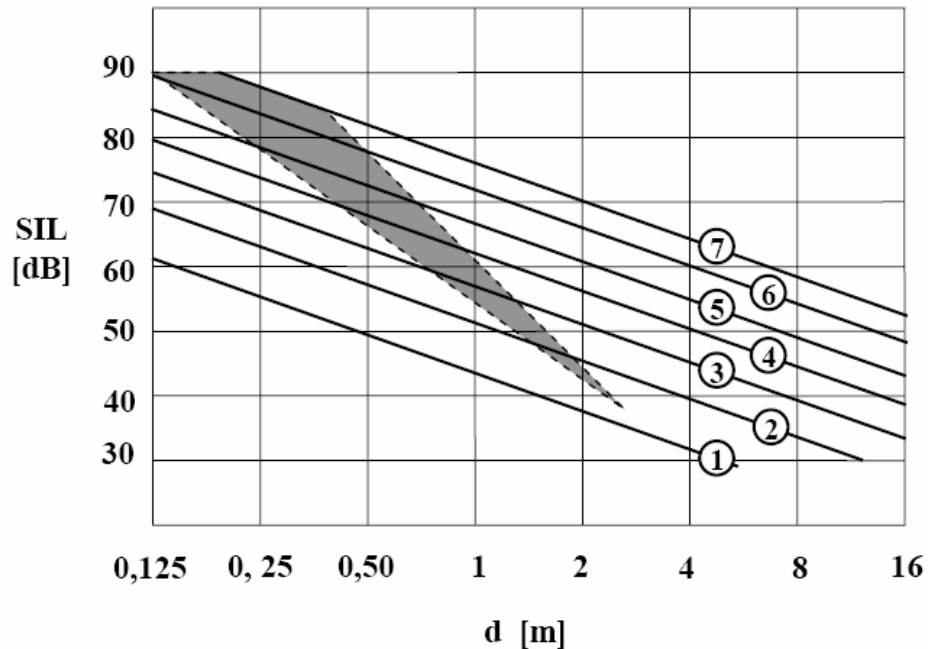


Figura 2.21. Criterio de interferencia a la palabra hablada para comunicación oral. Se indica el máximo nivel de interferencia a la palabra **SIL** aceptable en función de la distancia para diversos grados de esfuerzo vocal: **1)** Suave, **2)** Normal, **3)** Moderadamente fuerte, **4)** Fuerte, **5)** Muy fuerte, **6)** Gritando, **7)** Máxima emisión vocal.

EJEMPLO 2.2

En un ambiente existe un ruido blanco en la banda de audiofrecuencias cuyo nivel de presión sonora es de **75 dB**. Estimar el esfuerzo vocal de dos personas conversando a **1 m** de distancia.

Solución: La densidad espectral del ruido será constante e igual a

$$\overline{p^2} = \frac{P_{\text{ref}}^2 \cdot 10^{75/10}}{20.000 - 20}.$$

En la banda de **500 Hz**, que está comprendida entre **353 Hz** y **707 Hz**, el valor eficaz al cuadrado será

$$P_{\text{ef}}^2 = \overline{p^2} \cdot (707 - 353),$$



lo cual implica a cálculo hecho que el nivel de presión sonora en dicha banda será de **57,5 dB**. Dado que las siguientes bandas son cada una el doble de la anterior, el nivel de presión sonora se incrementará en **3 dB**. Entonces:

$$SIL = \frac{57,5 + 60,5 + 63,5 + 66,5}{4} \text{ dB} = 62 \text{ dB} .$$

A **1 m** de distancia, la figura 2.21. establece que la comunicación deberá realizarse en un nivel *fuerte*. De tratarse de voces masculinas, probablemente alcanzaría con un nivel *moderadamente fuerte*.

1.7.2. CRITERIO PARA EL RUIDO EN DIVERSOS AMBIENTES

En un ambiente para una aplicación determinada, por ejemplo una oficina pública o un aula, existe cierto ruido de fondo máximo compatible con un buen desempeño de las actividades a realizar en dicho ambiente. Si bien el nivel sonoro permite hasta cierto punto darse una idea de si el ambiente será o no considerado “ruidoso” por los usuarios, hay criterios más específicos. Uno de ellos es el de las **curvas NR** (noise rating curves), el cual ha sido objeto de normas nacionales y extranjeras como la **IRAM 4070** o la **ISO 1996**. En algunos países, como los Estados Unidos, se utilizan otros juegos de curvas similares, como las **curvas NC** (noise criterion), las **curvas PNC** (preferred noise criterion) o las **curvas NCB** (balanced noise criterion).

Las curvas **NR** (figura 2.22) han sido propuestas teniendo en cuenta principalmente el efecto del ruido sobre la comodidad de la comunicación oral y de la escucha de la música, a través de numerosas encuestas a personas expuestas a diversos ruidos en diversas actividades.

La obtención del valor **NR** que corresponde a determinado ruido ambiente consiste en trazar directamente sobre la familia de curvas el espectro de bandas de octava del ruido, y luego encontrar el menor valor de **NR** cuya curva asociada no es superada a ninguna frecuencia por el ruido a evaluar.

Las curvas se complementan con listas de actividades y ambientes con indicación del rango de valores **NR** admisibles. En la tabla 2.7 se incluye un listado, en el cual se ha supuesto que el ruido es exclusivamente el ruido de fondo, sin considerar el ruido adicional que podrían provocar la presencia de personas o las respectivas actividades normales.

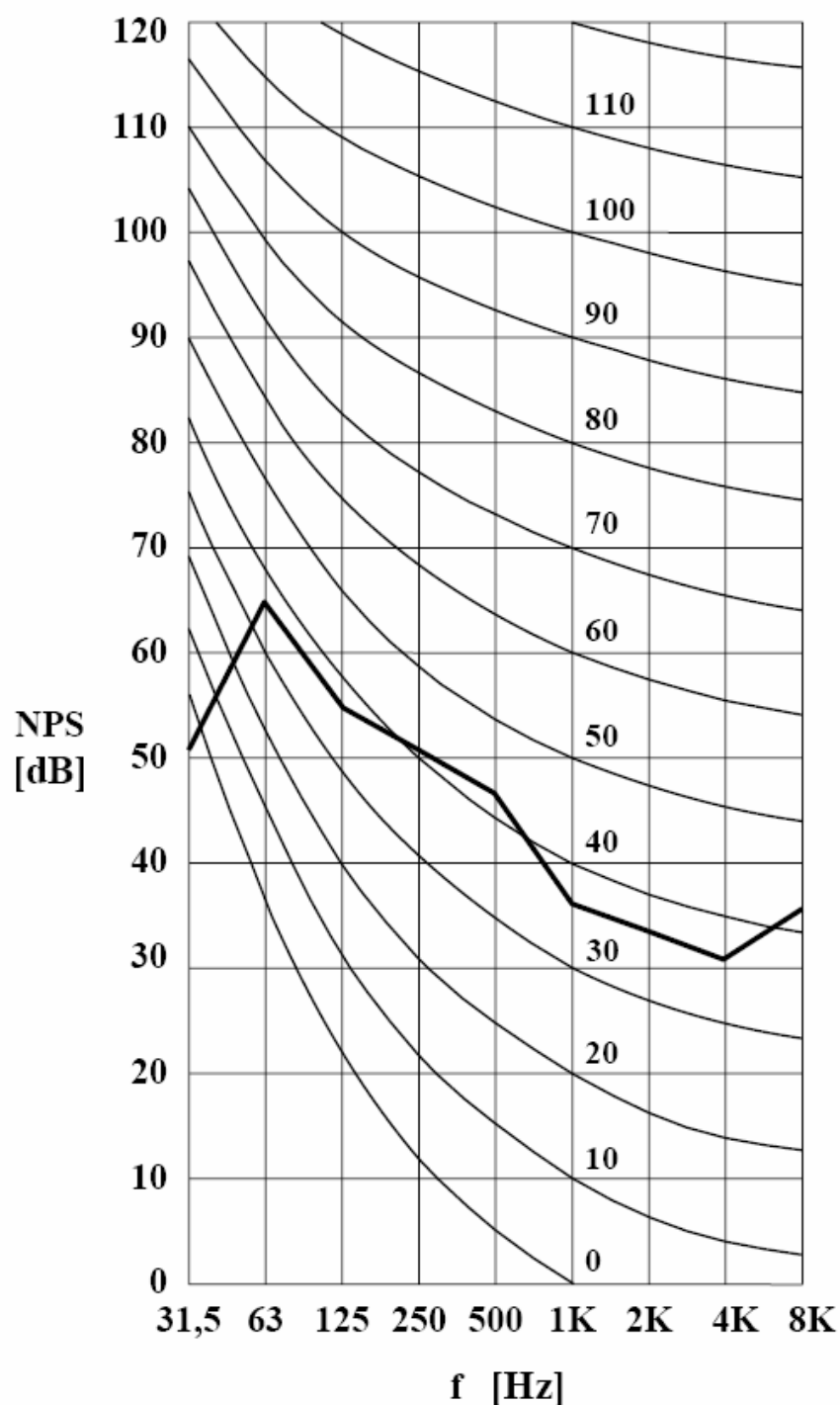


Figura 2.22. Curvas de criterio **NR** para la evaluación del ruido de fondo de un ambiente según las normas **ISO 1966** e **IRAM 4070**. En línea gruesa se ha indicado el espectro de bandas correspondiente al ejemplo 2.3.



EJEMPLO 2.3.

El ruido en una oficina pública tiene un espectro entre **31,5 Hz** y **8 kHz** con los siguientes niveles de presión sonora: **50 dB, 65 dB, 55 dB, 50 dB, 46 dB, 35 dB, 30 dB, 35 dB**. Determinar si es apta desde el punto de vista del ruido.

Solución: Del trazado del espectro de bandas de octava se obtiene (por interpolación) que el valor correspondiente de **NR** es **42**. De la tabla 2.7 resulta que para una oficina pública el valor **NR** debe estar entre **35** y **45**, por lo tanto esta oficina cumple con la recomendación.

Tabla 2.7. Valores de **NR** recomendados para diversos ambientes según la aplicación. No se incluye el ruido causado por las personas o por la actividad normal.

Ambiente	NR recomendado
Clínicas y cabinas audiométricas	10 - 20
Estudios de Radio y Televisión	15 - 20
Salas de concierto	20 - 25
Teatros	20 - 25
Residencias rurales	20 - 30
Residencias suburbanas	25 - 35
Templos	25 - 35
Salas de conferencia	25 - 35
Cines	25 - 35
Aula de escuela	25 - 35
Salas de lectura de escuela	25 - 30
Habitaciones de hospital	25 - 35
Residencias urbanas	30 - 40
Habitaciones de hotel	30 - 40



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Oficinas privadas	30 - 40
Bibliotecas	30 - 40
Quirófanos	30 - 40
Pasillos de hospital	35 - 45
Restaurantes, bares, comedores	35 - 45
Oficinas públicas	35 - 45
Gimnasios	35 - 50
Piscinas	40 - 55
Salones de venta comerciales	40 - 50
Grandes tiendas	50 - 55
Estacionamientos	50 - 55
Talleres	60 - 70



2. 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.

2.1 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.

2.2 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.

2.3 Problema 3

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

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

3 SOLUCIONES PROBLEMAS

3.1 Problema 1

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

De aquí obtenemos

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

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

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

Otra forma de obtener lo mismo es:

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

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.

3.2 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.

3.3 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

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

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

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:

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



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Y por tanto el nivel será de,

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

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

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

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

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

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA (T3)

INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA DE SALAS

Fundamentos de Acústica

Edición 2011-2012

Profesor: Juan M. Navarro

UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN ANTONIO DE MURCIA



Contenido

1. ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA.....	3
2. FUNDAMENTOS DE ACONDICIONAMIENTO	5
2.1. El campo sonoro en recintos	5
2.2. Absorción de la energía sonora.....	10
2.2.1. Absorción de la energía sonora en el aire	10
2.2.2. Absorción superficial del sonido.....	13
2.3. Recintos reverberantes.....	18
2.3.1 Camino libre medio	18
2.3.2. Régimen de extinción del sonido	19
2.3.3. Tiempo de reverberación	21
2.3.4. Régimen de crecimiento del sonido	22
3. FUNDAMENTOS DE AISLAMIENTO	26
3.1. Tipos de ruido según su método de transmisión.....	27
3.2 Fuentes de ruido	29
3.2.1 Fuentes de ruido externas a la edificación	29
3.2.2 Fuentes de ruido internas a la edificación	33
3.3. Transmisión del sonido a través de tabiques	42
3.3.1. La ley de la masa	42
3.3.2. Pérdida de transmisión compuesta.....	46
3.3.3. Pérdida de transmisión y nivel de presión sonora	48



1. 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.



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 L_N ;
- b) Tiempo de reverberación T ;
- c) Pérdidas de transmisión sonora de paredes, suelos y techos TL ; etc.

2. 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.

2.1. 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 3.1 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.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

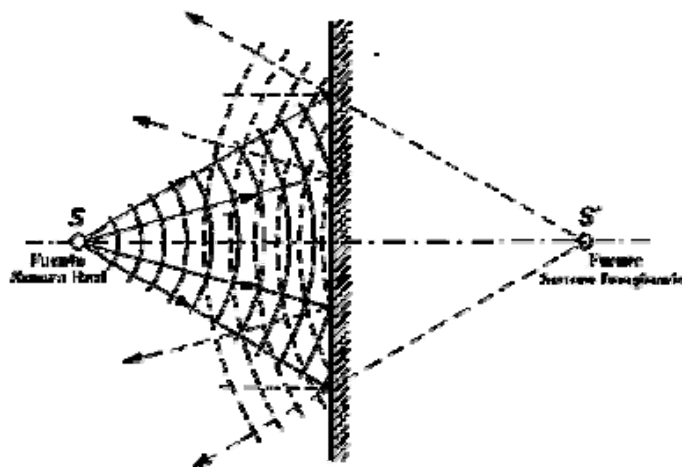


Figura 3.1. Reflexión de las ondas sonoras en una superficie plana.

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 3.2).

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.

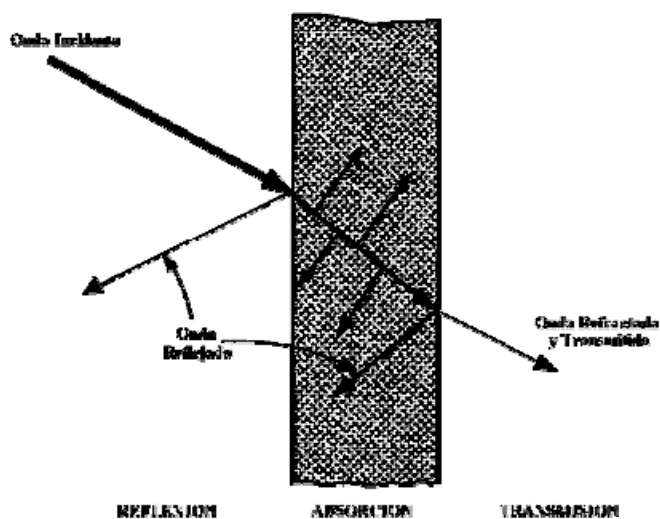


Figura 3.2. Reflexión y transmisión de ondas sonoras sobre superficies.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

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 3.3):

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.

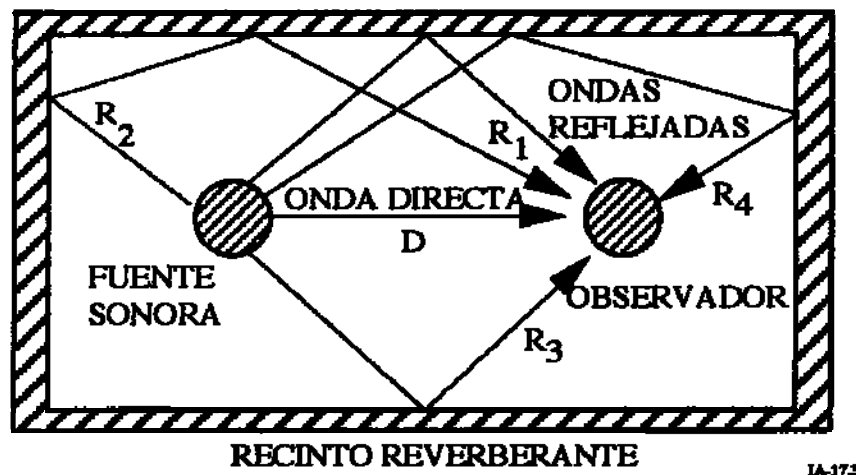


Figura 3.3. Ondas directa y reflejadas en un recinto.

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 3.4), y sumar su energía evitando que el intervalo entre los impulsos no exceda de un determinado tiempo.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

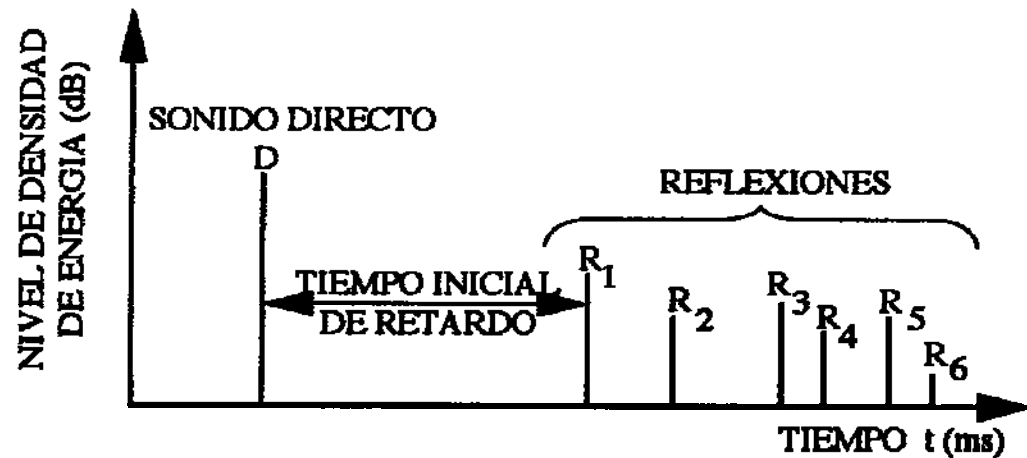


Figura 3.4. Diagrama de llegada de las ondas sonoras directa y reflejadas al observador.

En esta figura se observa cómo llega al receptor primero el sonido directo D, en el gráfico de tiempos, recibándose posteriormente en el tiempo las reflexiones $R_1, R_2, \dots$. 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.

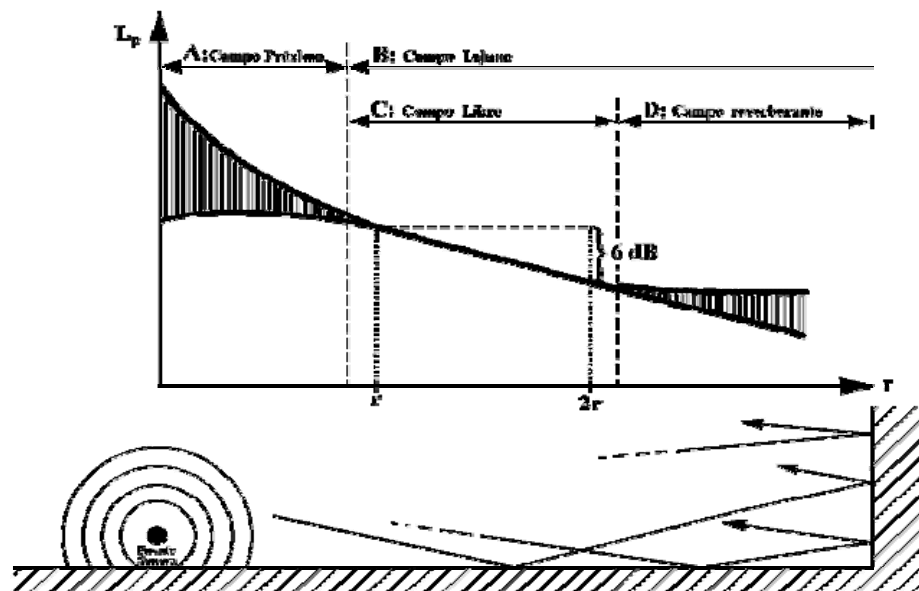


Figura 3.5. Descripción del campo sonoro que rodea a una fuente en un recinto reverberante.



La naturaleza del campo sonoro que rodea a una fuente en un recinto (figura 3.5), 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.



2.2. Absorción de la energía sonora

Idealmente, la energía sonora radiada se conserva. En una onda plana, esto significa que la densidad de energía (energía sonora por unidad de volumen) es constante con la distancia a la fuente. En una onda esférica, significa que la densidad de energía disminuye con el cuadrado de la distancia (pues la misma energía debe distribuirse sobre una superficie que aumenta).

En el caso real, en cambio, parte de la energía sonora se transforma en calor u otras formas de energía debido a la absorción que tiene lugar en el propio aire y en las superficies sobre las cuales incide la onda sonora.

2.2.1. Absorción de la energía sonora en el aire

En el aire suceden dos tipos de fenómenos que conducen a la absorción de energía: la **atenuación clásica**, que incluye el rozamiento viscoso y la conducción del calor en el aire, y la **atenuación molecular**, que involucra el intercambio de energía vibracional, rotacional y traslacional de las moléculas. A frecuencias inferiores a **30 kHz** predomina la atenuación molecular, que es fuertemente dependiente de la frecuencia, la temperatura, y la humedad relativa ambiente.

Estos fenómenos causan una reducción de la densidad de energía sonora con respecto al valor teórico que resulta ser exponencial con la distancia recorrida por la onda:

$$D(r) = D_o e^{-mr}$$

donde **D_o** es la densidad de energía en un punto cualquiera, **$D(r)$** es la densidad de energía a una distancia r del punto anterior (en la dirección de propagación de la onda), y **m** es el coeficiente de atenuación de energía, que involucra las atenuaciones clásica y molecular. Debido a esta relación exponencial, es fácil ver que la densidad de energía se reduce una determinada cantidad de decibelios por unidad de distancia. Debido a que los valores usuales de **m** son pequeños, es más práctico expresar esta atenuación en dB/100 m. Si llamamos Γ_m a la atenuación así expresada, debe cumplirse

$$\Gamma_m = -10 \log_{10} \frac{D(100m)}{D_o} = -10 \log_{10} e^{-m \cdot 100m},$$

es decir

$$\Gamma_m = 10 \cdot m \cdot 100m \cdot \log_{10} e \cong 434m.$$

En la tabla 3.1. se incluyen los valores de Γ_m para diversos valores de frecuencia, temperatura y humedad relativa ambiente.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

EJEMPLO 3.1

Una fuente aproximadamente esférica al aire libre produce un tono de **2 kHz** de **95 dB** de nivel de presión sonora a **1 m** de distancia. Suponiendo que la temperatura es de **25 °C** y que la humedad relativa ambiente es de un **80 %**, determinar el nivel de presión sonora a **60 m** de la fuente y comparar con el valor que se obtendría si no existiera la atenuación en el aire.

Solución: Dado que la fuente es esférica, el nivel de presión sonora sin atenuación en el aire sería

$$NPS_{60\text{ m}} = 95\text{ dB} - 20 \log_{10} \frac{60}{1} = 59,43\text{ dB} .$$

Veamos ahora el efecto de la atenuación atmosférica. Para ello, de la tabla obtenemos primero $\Gamma_m = 1,05 \text{ dB}/100\text{ m}$. Entonces la reducción del nivel de presión sonora será

$$\Delta NPS = -\frac{60}{100} 1,07 = -0,64\text{ dB}$$

y entonces

$$NPS = 59,43 - 0,64 = 58,8\text{ dB}$$

La reducción no ha sido demasiado significativa. A frecuencias más altas, o a mayor distancia, el efecto hubiera sido más notorio.



Tabla 3.1. Atenuación en el aire Γ_m en $\text{dB}/_{100 \text{ m}}$, en función de la frecuencia, la temperatura centígrada (**T**) y la humedad relativa ambiente (**HRA**). Los casilleros en blanco corresponden a datos no disponibles.

HRA [%]	T [°C]	Frecuencia [Hz]						
		125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
20	10	0,058	0,120	0,327	1,100	3,62	9,15	15,4
	15	0,065	0,122	0,270	0,817	2,82	8,88	20,2
	20	0,071	0,139	0,260	0,653	2,15	7,41	21,5
	25	0,074	0,164	0,286	0,587	1,70	5,88	19,6
	30	0,073	0,187	0,341	0,600	1,45	4,71	16,5
	35	0,068	0,200	0,412	0,682	1,37	3,93	13,6
30	10	0,055	0,105	0,228	0,677	2,35	7,66	18,7
	15	0,060	0,121	0,223	0,545	1,77	6,20	19,0
	20	0,062	0,142	0,252	0,501	1,41	4,85	16,6
	25	0,059	0,160	0,304	0,527	1,22	3,88	13,7
	30	0,054	0,168	0,367	0,615	1,18	3,27	11,3
	35	0,049	0,165	0,422	0,755	1,28	2,97	9,45
40	10	0,052	0,104	0,198	0,507	1,68	5,90	17,7
	15	0,054	0,123	0,218	0,451	1,31	4,57	15,6
	20	0,052	0,139	0,263	0,465	1,12	3,60	12,8
	25	0,048	0,147	0,319	0,539	1,07	3,01	10,4
	30	0,043	0,145	0,370	0,663	1,14	2,70	8,71
	35	0,038	0,136	0,400	0,815	1,34	2,65	7,59
60	10	0,045	0,105	0,190	0,386	1,10	3,84	13,4
	15	0,043	0,118	0,231	0,406	0,95	3,03	10,8
	20	0,039	0,123	0,279	0,480	0,93	2,54	8,78
	25	0,034	0,118	0,318	0,596	1,02	2,32	7,34
	30	0,030	0,109	0,336	0,729	1,22	2,34	6,47
	35	0,026	0,098	0,332	0,845	1,51	2,58	6,07
80	10	0,038	0,102	0,197	0,357	0,88	2,87	10,3
	15	0,034	0,107	0,240	0,415	0,83	2,37	8,28
	20	0,030	0,104	0,277	0,515	0,90	2,13	6,86
	25	0,026	0,096	0,295	0,635	1,07	2,11	5,98
	30	0,023	0,086	0,291	0,741	1,33	2,31	5,57
	35	0,020	0,076	0,273	0,803	1,64	2,74	5,60
100	10	0,032	0,096	0,203	0,355	0,77	2,35	8,37
	15	0,029	0,096	0,241	0,435	0,80	2,03	6,81
	20	0,025	0,090	0,283	0,542	0,92	1,94	5,81
	25	0,021	0,080	0,266	0,647	1,14	2,06	5,28
	30	0,018	0,071	0,252	0,717	1,42	2,40	5,18
	35	0,016	0,061	0,230	0,737	1,71	2,93	5,50



2.2.2. Absorción superficial del sonido

Cuando una onda sonora incide sobre una superficie idealmente rígida, se refleja sin pérdida alguna de energía. Si la superficie, en cambio, posee elasticidad, parte de la energía es utilizada para desplazar la superficie comunicándole energía cinética. Se genera así una onda reflejada con menor energía y otra onda que se propaga hacia el interior de la superficie, denominada onda refractada u onda transmitida. En la figura 3.6 se ilustra este fenómeno. Si la onda incidente es plana y llega con un ángulo de incidencia φ (ángulo entre la dirección de propagación de la onda y la normal a la superficie), la onda reflejada también formará un ángulo φ en sentido opuesto, propiedad denominada ley de la reflexión, mientras que la onda transmitida formará respecto a la normal un ángulo ψ que satisface la ley de Snell:

$$\frac{\text{sen}\varphi}{c_1} = \frac{\text{sen}\psi}{c_2} .$$

Esta ley es bien conocida en Óptica, y en realidad tiene vigencia para cualquier fenómeno ondulatorio que se produce en la interfase entre dos medios.

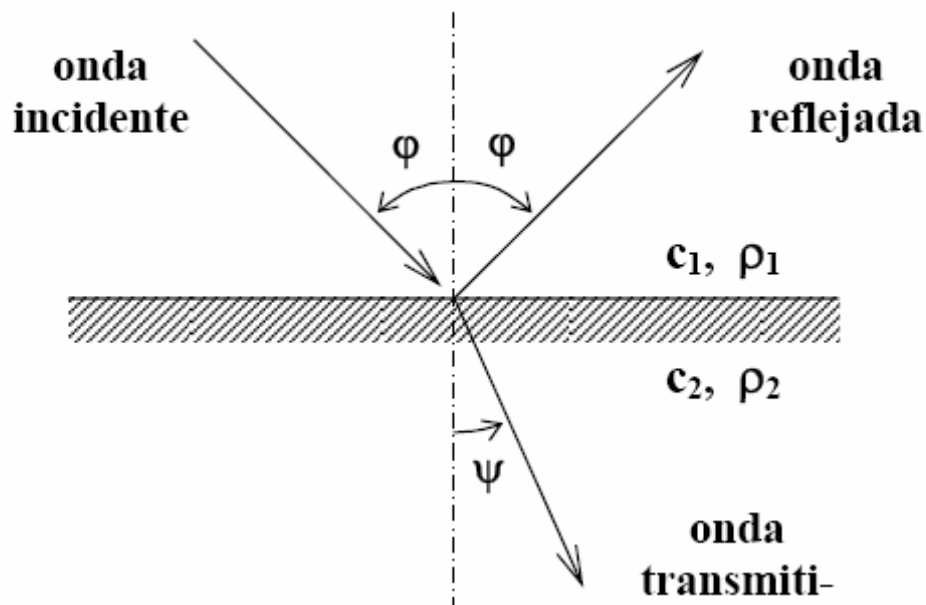


Figura 3.6. Cuando una onda sonora incide sobre la superficie de separación entre dos medios, se generan dos nuevas ondas: la onda reflejada, y la onda transmitida, cuyos ángulos verifican la Ley de Snell.



Supongamos ahora que la onda incidente tiene una presión sonora eficaz sobre la superficie de valor $P_{i\text{ef}}$. Entonces las ondas reflejada y transmitida tendrán valores eficaces $P_{r\text{ef}}$ y $P_{t\text{ef}}$ respectivamente, dados por

$$P_{r\text{ef}} = R \cdot P_{i\text{ef}},$$

$$P_{t\text{ef}} = T \cdot P_{i\text{ef}},$$

donde R es el **coeficiente de reflexión** y T el **coeficiente de transmisión**, que se calculan por medio de las expresiones¹

$$R = \frac{Z_2 \cos\varphi - Z_1 \cos\psi}{Z_2 \cos\varphi + Z_1 \cos\psi},$$

$$T = \frac{2Z_2 \cos\varphi}{Z_2 \cos\varphi + Z_1 \cos\psi},$$

en las cuales Z_1 y Z_2 son las impedancias acústicas de los medios emisor y receptor:

$$Z_1 = \rho_1 c_1,$$

$$Z_2 = \rho_2 c_2.$$

Calculemos ahora la potencia sonora que incide sobre un fragmento de superficie de área S y las potencias reflejada y absorbida.

$$I_i = \frac{P_{i\text{ef}}^2}{Z_1}, \quad I_r = \frac{P_{r\text{ef}}^2}{Z_1}, \quad I_t = \frac{P_{t\text{ef}}^2}{Z_2}.$$

Para convertir la intensidad en una potencia, hay que multiplicarla por la superficie transversal a la dirección de propagación de la onda. Debido a la inclinación de las ondas (ver figura 3.7), la superficie transversal a la dirección de propagación que corresponde a la superficie S es su proyección según el ángulo φ , vale decir $S \cos \varphi$. Entonces la potencia que incide sobre la superficie S será

$$Pot_i = I_i S \cos\varphi = P_{i\text{ef}}^2 \frac{S \cos\varphi}{Z_1},$$

¹ La demostración de estas fórmulas excede el alcance de este texto. Se realiza planteando la expresión de tres ondas planas sujetas a la condición de que las velocidades de las partículas en ambos lados de la superficie de separación deben coincidir, al igual que las presiones.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

y análogamente, las potencias reflejadas y transmitidas por la superficie **S** resultan

$$\text{Pot}_r = P_{\text{ref}}^2 \frac{S \cos \varphi}{Z_1},$$

$$\text{Pot}_t = P_{\text{tef}}^2 \frac{S \cos \psi}{Z_2}.$$

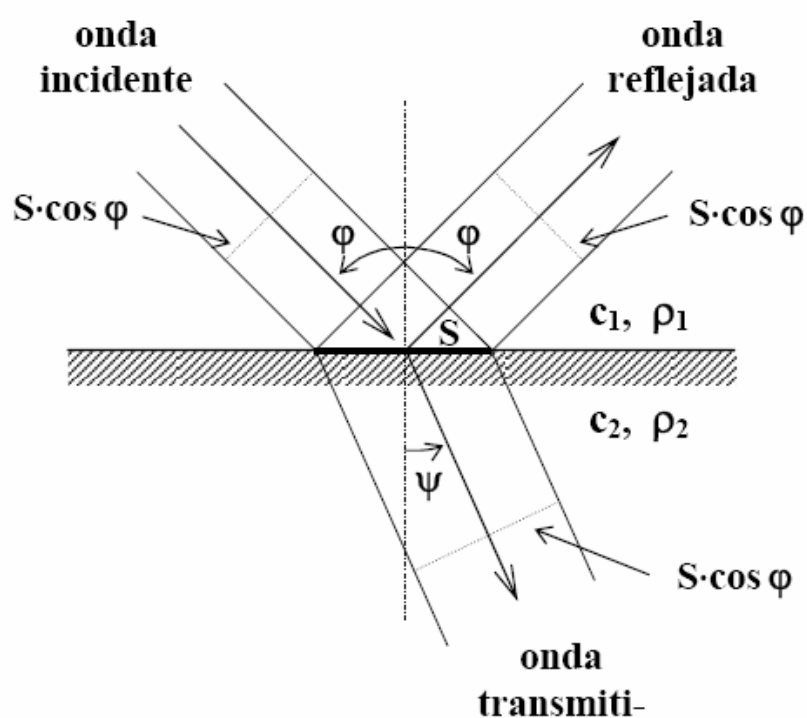


Figura 3.7. Disposición geométrica que permite calcular las potencias incidente, reflejada y transmitida cuando una onda plana alcanza la superficie que limita dos medios.

Sustituyendo las ecuaciones anteriores,

$$\text{Pot}_r = R^2 P_{\text{ief}}^2 \frac{S \cos \varphi}{Z_1} = R^2 \text{Pot}_i,$$

$$\text{Pot}_t = T^2 P_{\text{ief}}^2 \frac{S \cos \psi}{Z_2} = T^2 \frac{Z_1 \cos \psi}{Z_2 \cos \varphi} \text{Pot}_i.$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Esta última también puede expresarse como

$$\text{Pot}_t = (1 - R^2) \text{Pot}_i ,$$

debido a que la potencia transmitida es igual a la incidente menos la reflejada (probarlo como ejercicio).

Podemos comprobar que si Z_1 y Z_2 son muy diferentes la mayor parte de la energía sonora incidente será reflejada. En efecto, si $Z_1 \gg Z_2$, como sucede por ejemplo en una onda que proviene del interior de un líquido o un sólido y se dirige hacia el aire, resulta $T \ll 1$ y $R \cong -1$, por lo cual

$$\text{Pot}_r \cong \text{Pot}_i ,$$

$$\text{Pot}_t \ll \text{Pot}_i .$$

Si, en cambio, $Z_1 \ll Z_2$, como sucede con las ondas aéreas que inciden sobre una superficie líquida o sólida, resulta $T \cong 2$ y $R \cong 1$.

Observemos que si bien la onda transmitida tiene el doble de amplitud que la incidente, una presión algo mayor en un medio cuya impedancia acústica es mucho más alta de hecho transporta mucho menos energía.

Podemos definir el **coeficiente de absorción sonora**, α , como el cociente entre la potencia transmitida y la incidente:

$$\alpha = \frac{\text{Pot}_t}{\text{Pot}_i} = T^2 \frac{Z_1 \cos \psi}{Z_2 \cos \varphi} = 1 - R^2 ,$$

o bien, reemplazando,

$$\alpha = \frac{4 Z_1 Z_2 \cos \varphi \cos \psi}{(Z_2 \cos \varphi + Z_1 \cos \psi)^2} .$$



Vemos que el valor del coeficiente de absorción α depende del ángulo de incidencia. Sin embargo, dado que en los recintos el campo sonoro en general es **difuso**,² normalmente es más útil el valor promedio para los diversos ángulos de incidencia.

Debe hacerse notar que el análisis anterior fue hecho bajo el supuesto tácito de que ambos medios son **homogéneos**³ e **isotrópicos**,⁴ lo cual sólo es estrictamente cierto en el caso en que el cambio de fase es entre dos medios fluidos (aire y agua, por ejemplo). Dado que en la mayoría de los materiales acústicos esta hipótesis no se cumple por tener una gran complejidad estructural, carece de sentido práctico profundizar el estudio de las ecuaciones anteriores, *que fueron expuestas sólo para ilustrar el fenómeno físico*. Por otra parte, también se supuso tácitamente que los dos medios se extendían infinitamente, lo cual en la práctica no sucede. En lugar de ello es habitual que uno de los medios sea el aire, y el otro, cierto espesor de material acústico, que puede estar apoyado directamente sobre un tercer material (una pared) o separado del mismo mediante un espacio de aire. En cualquier caso existen ordinariamente dos ó más superficies límite entre dos medios, y en cada una de ella se producen los efectos mencionados. El resultado es que el coeficiente de absorción puede depender fuertemente del montaje, tal como se estudia en la asignatura “Acústica Arquitectónica”.

Desde el punto de vista del usuario, el enfoque suele ser más empírico, utilizando valores especificados por el fabricante o medidos en el laboratorio. Lo más habitual es proporcionar el coeficiente de absorción sonora para **incidencia aleatoria** (para campo difuso), aunque en algunos casos puede indicarse también el coeficiente para **incidencia normal** ($\varphi = 0$), α_N , cuyo valor será de utilidad en aquellos casos en que el material acústico esté sometido a ondas planas normales.

Por último podemos obtener un fórmula que vincula la densidad de energía de las ondas incidente D_i y reflejada D_r . Para ello basta tener en cuenta que para una onda plana hay una relación directa entre la densidad de energía y la intensidad. Entonces la densidad de energía absorbida será αD_i , por lo tanto

$$D_r = D_i(1 - \alpha).$$

² Un campo sonoro es **difuso** cuando en un instante determinado es igualmente probable que la onda sonora se propague en cualquier dirección, ya que es el resultado de la superposición de ondas que viajan en todas direcciones.

³ Un medio es **homogéneo** cuando no existen en su seno cambios de composición, estructura, etc. Por ejemplo, una chapa de hierro puede considerarse homogénea, no así una pared de hormigón, que contiene diversos componentes, ni tampoco una espuma de poliuretano, que alterna porciones del material propiamente dicha con intersticios de aire.

⁴ Un medio es **isotrópico** cuando sus propiedades no cambian con la dirección examinada. Así, un fluido (gas o líquido) es isotrópico respecto a la velocidad del sonido, no así un sólido, en el cual la velocidad del sonido puede depender de si se está en presencia de una chapa delgada, una barra esbelta, o un volumen de dimensiones considerables.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

2.3. Recintos reverberantes

En lo que sigue aplicaremos el concepto de absorción sonora a recintos de forma irregular y estudiaremos la relación entre la absorción y la acumulación y la disipación de energía acústica.

2.3.1 Camino libre medio

Dado un recinto, una misma onda sonora se refleja una y otra vez en las diversas superficies del mismo (figura 3.8), perdiéndose en cada reflexión algo de energía como resultado de la absorción superficial y, si el recinto es grande, de la atenuación en el aire.

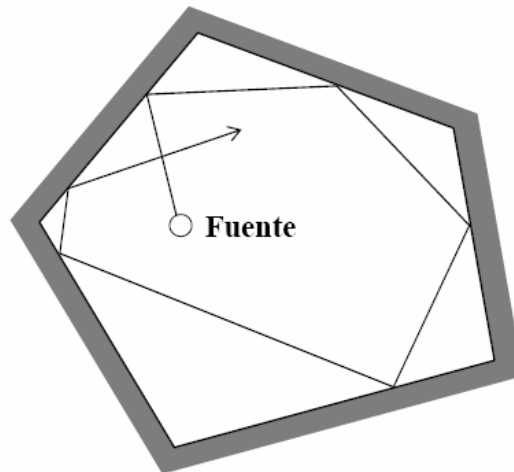


Figura 3.8. Un recinto irregular con una fuente sonora. El sonido radiado se refleja sucesivamente en las diversas superficies del recinto. Aún cuando inicialmente el sonido es radiado en todas direcciones, por simplicidad se muestra una sola dirección.

Si elegimos una dirección inicial de propagación de la onda, es fácil obtener las direcciones sucesivas después de reflejarse en cada superficie, tomando ángulos iguales pero opuestos respecto a la normal (ley de la reflexión). El resultado será un conjunto de trayectorias rectilíneas cuyas direcciones y longitudes serán pseudoaleatorias. Cuando el recinto es de forma algo irregular, después de un gran número de reflexiones es posible obtener un promedio de las longitudes recorridas entre dos reflexiones consecutivas. Tal promedio se denomina **camino libre medio**, y es un hecho afortunado que sea posible determinarlo mediante una fórmula muy sencilla:

$$\bar{d} = 4 \frac{V}{S},$$

donde **V** es el volumen del recinto, y **S** la superficie total que encierra a dicho volumen.



2.3.2. Régimen de extinción del sonido

Consideremos un recinto cuyas superficies interiores tienen un coeficiente de absorción sonora α , en el cual existe inicialmente una densidad de energía sonora media D_0 . Supongamos que en el instante $t = 0$ se interrumpe la fuente. Si llamamos D_1, D_2 , etc. a la densidad de energía después de 1, 2, etc. reflexiones, entonces,

$$\begin{aligned} D_1 &= D_0(1 - \alpha) \\ D_2 &= D_0(1 - \alpha)^2 \\ &\vdots \\ D_n &= D_0(1 - \alpha)^n. \end{aligned}$$

Nos interesa determinar de qué manera evoluciona D en función del tiempo, más que en función del número de reflexiones. Para ello tengamos en cuenta que en un tiempo t la onda recorrió una distancia ct , y el número de reflexiones puede aproximarse dividiendo dicha distancia por el camino libre medio:

$$n \cong \frac{ct}{d} \cong \frac{S}{4V} ct,$$

de donde la densidad de energía en el instante t resulta

$$D(t) = D_0(1 - \alpha)^{\frac{S}{4V} ct},$$

o bien

$$D(t) = D_0 e^{\ln(1 - \alpha) \frac{S}{4V} ct}.$$

Esta fórmula contempla sólo el efecto de la absorción superficial y por consiguiente es una aproximación válida sólo para recintos relativamente pequeños, en los que la atenuación del aire sea despreciable. Para recintos mayores, debe aplicarse el factor de atenuación del aire:

$$D(t) = D_0 e^{\ln(1 - \alpha) \frac{S}{4V} ct} e^{-mct},$$

o bien

$$D(t) = D_0 e^{\left(m - \frac{S}{4V} \ln(1 - \alpha)\right) ct}.$$

Hasta ahora hemos considerado el caso en que la absorción sonora era constante sobre toda la superficie del recinto. En el caso más habitual, las diversas superficies de una habitación o sala están recubiertas con materiales de diferente absorción sonora. Si tenemos n porciones de área S_i y coeficiente de absorción α_i , podemos obtener un **coeficiente de absorción promedio**, $\bar{\alpha}$, dado por



$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \dots + \alpha_n S_n}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i}{S}.$$

Como se observa, cada coeficiente α_i ha sido ponderado por el área S_i correspondiente. Dado que la absorción superficial de sonido no se realiza solamente en las superficies que rodean al recinto, sino también en los objetos y personas presentes, es necesario contemplar su efecto absorbente. Pero en muchos casos es difícil determinar en forma precisa el área de dichos objetos o personas, por lo cual en lugar de especificar el coeficiente de absorción α se especifica el *área absorbente total*, es decir el valor αS (como un valor inseparable). Si bien dicha magnitud tiene dimensiones de área, no debe confundírsela con un área ordinaria. Por ese motivo se expresa en una unidad equivalente al m^2 , el **sabine**,⁵ **sb**, que representa una absorción equivalente a una ventana abierta de 1 m^2 .

Si los valores de α_i no son muy diferentes, o si el valor de $\bar{\alpha}$ es pequeño ($< 0,3$), entonces se puede reemplazar α por $\bar{\alpha}$ en la fórmula de la densidad de energía, obteniéndose

$$D(t) = D_o e^{-\left(m - \frac{S}{4V} \ln(1 - \bar{\alpha})\right) ct}.$$

Cuando $\bar{\alpha} \ll 1$, es decir cuando las superficies son poco absorbentes, se puede aproximar

$$\ln(1 - \bar{\alpha}) \cong -\bar{\alpha},$$

y entonces

$$D(t) \cong D_o e^{-\left(m + \frac{\bar{\alpha} S}{4V}\right) ct} \quad (\text{si } \bar{\alpha} \ll 1).$$

Si las superficies son muy absorbentes ($\bar{\alpha} \cong 1$), la aproximación anterior deja de ser válida. En efecto, debido a que en muy pocas reflexiones la energía sonora se reduce a niveles despreciables, la cantidad de reflexiones no llega a ser lo bastante alta para que su promedio se aproxime al camino libre medio (ya que éste es un promedio sobre *gran cantidad de reflexiones*).

⁵ El **sabine** definido es en realidad el **sabine métrico**. En Estados Unidos de América se utiliza el **sabine inglés**, definido como una absorción equivalente a una ventana abierta de 1 pie^2 .



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

2.3.3. Tiempo de reverberación

El **tiempo de reverberación** es un concepto muy útil para evaluar acústicamente distintos tipos de ambientes. Se define como el tiempo **T** necesario a partir de la interrupción de una fuente sonora para que la densidad de energía se reduzca en **60 dB**,⁶ es decir que se reduzca a una millonésima parte de la densidad de energía original:

$$D(T) = 10^{-6} D_0 .$$

Esta reducción de **60 dB** fue adoptada porque es suficientemente grande como para causar la sensación perceptiva de que el sonido se extinguió. Reemplazando la expresión de la densidad de energía se obtiene

$$T = \frac{4 \ln 10^6}{c} \frac{V}{4Vm - S \ln(1 - \bar{\alpha})} .$$

Para una temperatura de **20 °C**, resulta

$$T = 0,161 \frac{V}{4Vm - S \ln(1 - \bar{\alpha})} . \quad \text{Formula de Eyring}$$

Para $\bar{\alpha} < 0,2$ puede aproximarse el logaritmo, y entonces

$$T \cong 0,161 \frac{V}{4Vm + \bar{\alpha} S} . \quad \text{Formula de Sabine}$$

EJEMPLO 3.2

Si $\bar{\alpha} = 0,05$, determinar el tiempo de reverberación para una humedad relativa del **60 %** y una temperatura de **25 °C**, correspondiente a una sala de **10 m × 20 m × 40 m** si se la excita con una frecuencia de **2 kHz**.

Solución: Resulta

$$A = 2 \times (10 \times 20 + 10 \times 40 + 20 \times 40) \text{ m}^2 = 2.800 \text{ m}^2$$

$$V = 10 \times 20 \times 40 \text{ m}^3 = 8.000 \text{ m}^3$$

⁶ También se suele notar el tiempo de reverberación con los símbolos **T₆₀** ó **RT60**.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

$$m = \frac{1}{434} \Gamma_m = \frac{1}{434} 1,10 = 0,0025 \frac{1}{m} .$$

Entonces

$$T = 0,16 \frac{8000}{80 + 140} = 5,8 \text{ seg} .$$

Vemos que la atenuación debida al aire tiene un efecto importante, ya que reduce el tiempo de reverberación de **9,1 seg** a **5,8 seg**. Ello se debe a que el tamaño de la sala es considerable. En habitaciones más pequeñas la atenuación en el aire puede despreciarse.

EJEMPLO 3.3

Repetir el ejemplo anterior reduciendo las dimensiones a un tercio de las originales (es decir **3,33 m × 6,66 m × 13,33 m**).

Solución: En este caso resulta

$$A = 311 \text{ m}^2$$

$$V = 296 \text{ m}^3$$

y por lo tanto

$$T = 0,16 \frac{296}{2,96 + 15,6} = 2,6 \text{ seg} .$$

El efecto de la atenuación en el aire es mucho menor, reduciendo el tiempo de reverberación de **3 seg** a **2,6 seg**.

2.3.4. Régimen de crecimiento del sonido

Nos interesa ahora determinar cómo se establece el estado de régimen del campo sonoro. Consideraremos el caso de un campo que puede suponerse que es en todo momento difuso, es decir que su densidad de energía es constante a lo largo del recinto y que no existen direcciones privilegiadas para las ondas sonoras.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Sea **Pot** la potencia acústica⁷ entregada por la fuente y **P_{abs}** la potencia absorbida en el aire y en las superficies. Entonces se tiene

$$Pot - P_{abs} = \frac{dD(t)}{dt} V .$$

Calculemos **P_{abs}**. Para ello tengamos en cuenta que en una reflexión la densidad de energía se reduce afectándose por el factor

$$(1 - \bar{\alpha}) e^{-m\bar{d}} = e^{\ln(1 - \bar{\alpha}) - m\bar{d}} .$$

En un tiempo Δt hay $n = \Delta t \cdot c / \bar{d}$ reflexiones (dado que cada reflexión requiere un tiempo $\bar{d}/c$). La energía absorbida en ese tiempo es la diferencia entre la energía original y la que hay ahora, después de haberse reducido n veces a través del factor de la ecuación anterior, es decir

$$\Delta E_{abs} = \left(1 - e^{(\ln(1 - \bar{\alpha}) - m\bar{d}) \frac{c}{\bar{d}} \Delta t} \right) V D(t) .$$

Podemos obtener la potencia absorbida **P_{abs}** dividiendo por Δt y pasando al límite cuando $\Delta t \rightarrow 0$. Resulta

$$P_{abs} = \left(m - \frac{1}{\bar{d}} \ln(1 - \bar{\alpha}) \right) c V D(t) .$$

es decir

$$P_{abs} = \left(m - \frac{S}{4V} \ln(1 - \bar{\alpha}) \right) c V D(t) .$$

Combinando las ecuaciones anteriores resulta la siguiente ecuación diferencial de primer orden

$$\frac{dD(t)}{dt} + \left(m - \frac{S}{4V} \ln(1 - \bar{\alpha}) \right) c D(t) = \frac{Pot}{V} ,$$

⁷ No debe confundirse potencia acústica con la potencia eléctrica que se entregaría a un altavoz. La potencia eléctrica siempre resulta mucho mayor que la potencia acústica efectivamente radiada debido al rendimiento energético muy bajo de los parlantes (1 % a 10 %).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

que para condiciones iniciales nulas (es decir, silencio inicial) tiene la solución siguiente:

$$D(t) = \frac{\frac{Pot}{Vc}}{m - \frac{S}{4V} \ln(1 - \bar{\alpha})} \left(1 - e^{-\left(m - \frac{S}{4V} \ln(1 - \bar{\alpha})\right) ct} \right).$$

También podemos obtener la presión eficaz teniendo en cuenta que,

$$D = \frac{P_{ef}^2}{\rho_0 c^2}.$$

Resulta⁸

$$P_{ef}^2(t) = \frac{\rho_0 c \frac{Pot}{Vc}}{m - \frac{S}{4V} \ln(1 - \bar{\alpha})} \left(1 - e^{-\left(m - \frac{S}{4V} \ln(1 - \bar{\alpha})\right) ct} \right).$$

Para $\bar{\alpha} \ll 1$, podemos aplicar la aproximación:

$$P_{ef}^2(t) = \rho_0 c \frac{Pot}{mV - \frac{\bar{\alpha} S}{4}} \left(1 - e^{-\left(m + \frac{\bar{\alpha} S}{4V}\right) ct} \right).$$

Finalmente, cuando el efecto de la atenuación en el aire es despreciable (salas pequeñas), puede aproximarse

⁸ Tal vez parezca extraño hablar de un valor eficaz que depende del tiempo. El sentido es el valor eficaz obtenido con un tiempo de integración relativamente corto, que permite un seguimiento de la evolución de la energía en el tiempo.



$$P_{ef}^2(t) = \rho_0 c \frac{4Pot}{\bar{\alpha}S} \left(1 - e^{-\frac{\bar{\alpha}S}{4V}ct} \right).$$

Podemos hacer las siguientes observaciones:

a) Se tiene un crecimiento exponencial hacia un valor final, cuya constante de tiempo es, por supuesto, la misma que en el caso de la extinción del sonido:

$$\tau = \frac{4V}{\bar{\alpha}Sc} = 0,0116 \frac{V}{\bar{\alpha}S}.$$

Igual que el tiempo de reverberación T , dicha constante de tiempo se reduce al aumentar $\bar{\alpha}$ (sala muy “seca” o “apagada”), y aumenta al reducirse $\bar{\alpha}$ (sala muy “viva” o reverberante). De hecho, su valor corresponde a aproximadamente un 7 % de T . Es interesante observar que después de transcurrido 3τ (es decir un 21 % de T) se alcanzó el 95 % del valor final de la energía sonora, lo cual corresponde a un error de – 0,22 dB. Vemos así que el crecimiento del sonido hasta su estado final parece mucho más rápido que su extinción. Ello se debe a que el primer tramo de la curva de crecimiento es casi lineal, mientras que el decrecimiento es siempre exponencial decreciente.

b) El crecimiento y decrecimiento del sonido en el interior de un recinto sigue la misma ley que la carga y descarga de un condensador eléctrico a través de una resistencia.

c) El valor de la presión cuadrática en el estado estacionario,⁹ es decir,

$$P_{ef}^2 = \rho_0 c \frac{4Pot}{\bar{\alpha}S},$$

es tanto mayor cuanto menor sea la absorción, es decir cuanto más reverberante sea el recinto. Esto se debe a que la mayor parte de la energía acústica es reflejada nuevamente hacia el interior del recinto, produciéndose una acumulación de la misma.

d) Si el tiempo de reverberación T es grande, resulta que mientras los sonidos largos alcanzan su nivel estacionario (con un nivel sonoro considerable) los muy cortos no llegan al valor estacionario que les correspondería. Esta situación se da entre las vocales y las consonantes. Las vocales (que son en general más largas), desarrollan un nivel sonoro considerable. Las consonantes, en cambio, por ser cortas, no. Las consonantes se ven, por consiguiente, doblemente perjudicadas en un recinto con gran reverberación. Por un lado, son débiles, y por el otro, no alcanzan a acumular energía

⁹ El estado estacionario se alcanza cuando la potencia acústica radiada por la fuente dentro de la sala iguala a la potencia absorbida por el aire y las superficies.



acústica en el recinto, y por lo tanto son fácilmente enmascaradas por las vocales que además de alcanzar un nivel mayor, se prolongan en su periodo de extinción sobre las consonantes que les siguen.

3. 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

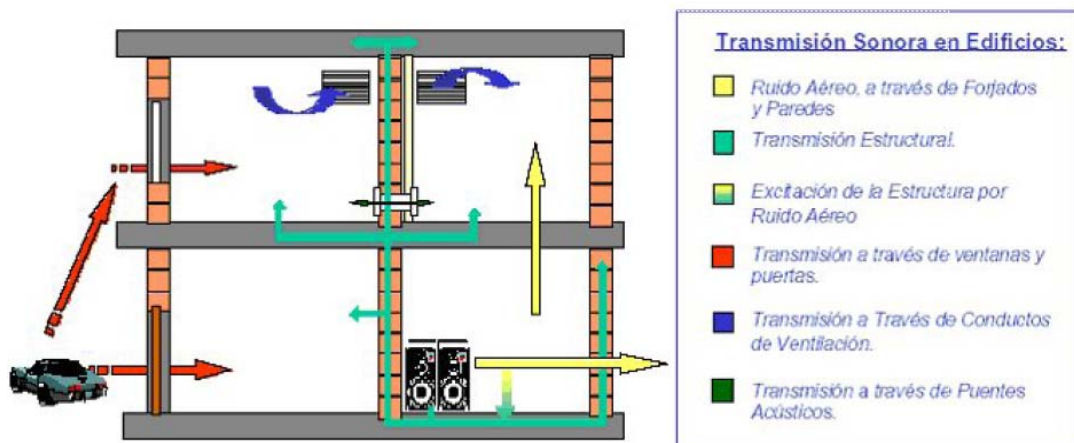
Fundamentos de Acústica

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.



3.1. Tipos de ruido según su método de transmisión

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.

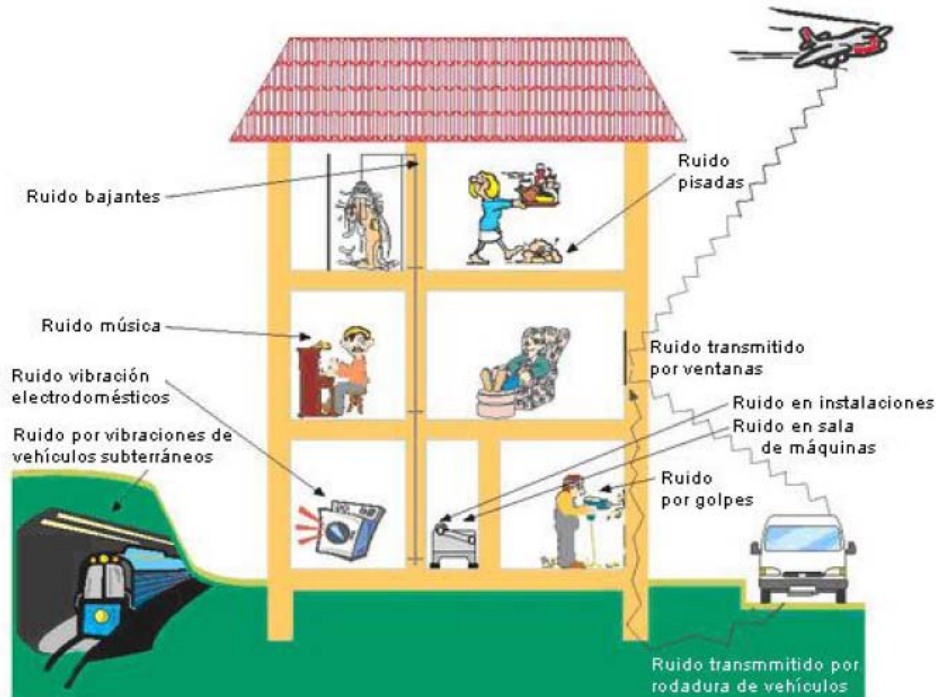
Según la forma de producirse y propagarse, el ruido puede ser:

- **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

Fundamentos de Acústica



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.



3.2 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.

3.2.1 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 3.9.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

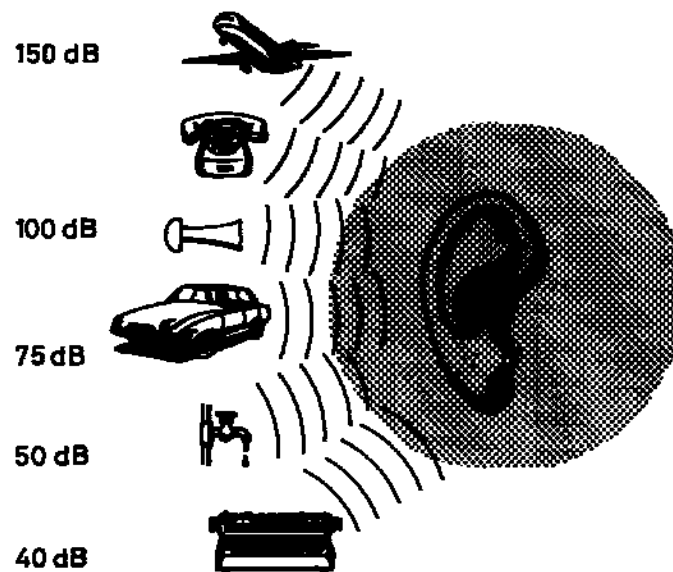


Figura 3.9. Ejemplos de diferentes tipos de ruidos y sus niveles.

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 3.10. 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

Fundamentos de Acústica

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 3.11. 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 sí, 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.

3.2.2 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 cocktail".

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.

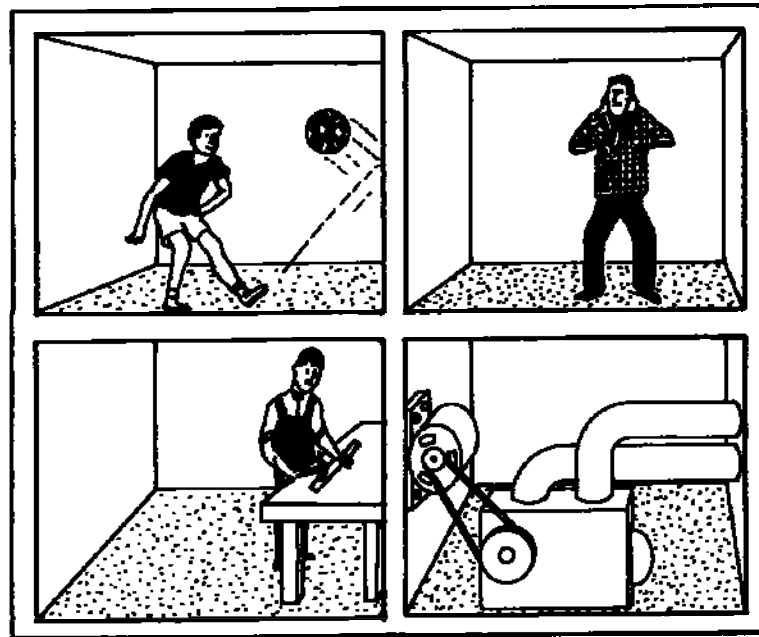


Figura 3.12. Fuente interna: impactos.

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.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

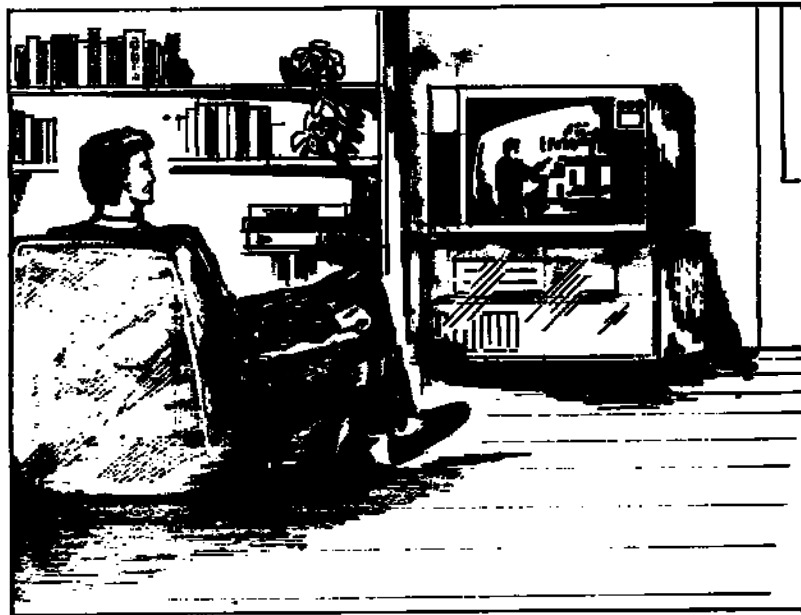


Figura 3.13. Fuente de ruido interna: aparatos de radio y televisión.

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

Fundamentos de Acústica

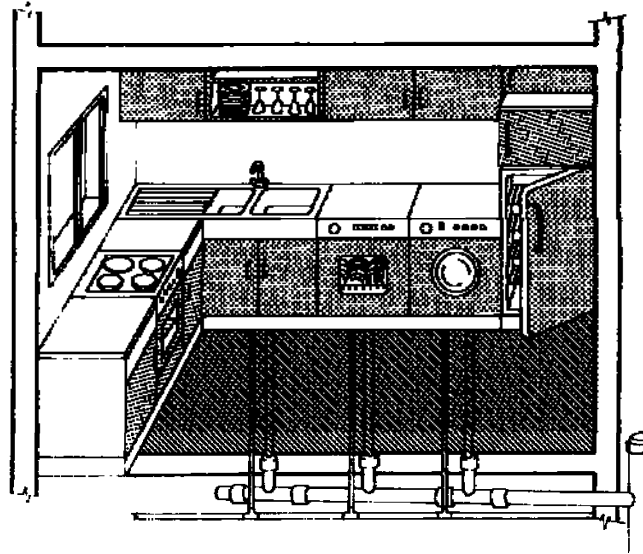


Figura 3.14. Fuente de ruido interna: aparatos electrodomésticos.

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.

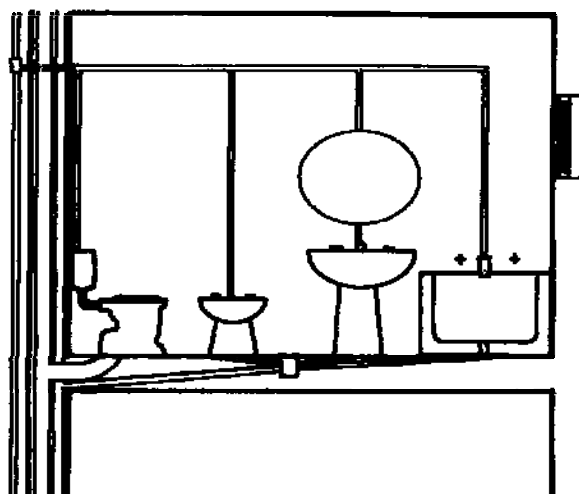


Figura 3.15. Fuente de ruido interna: instalaciones de fontanería.

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).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

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.

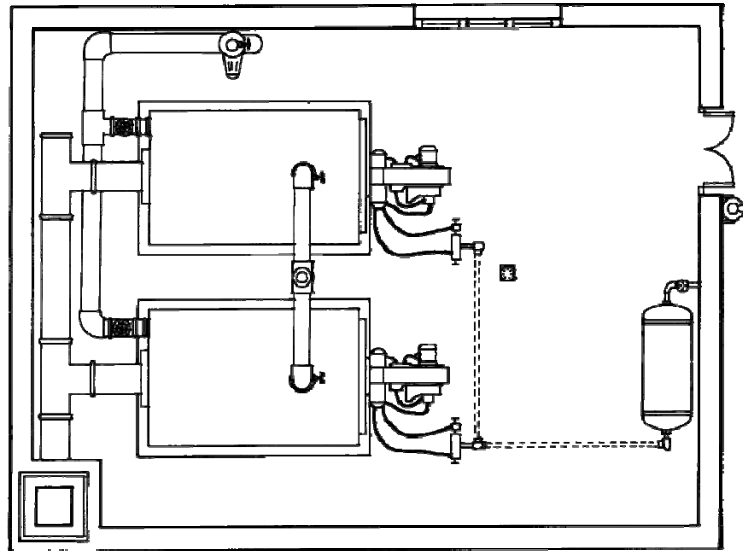


Figura 3.16. Fuente de ruido interna: instalaciones de calefacción.

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.

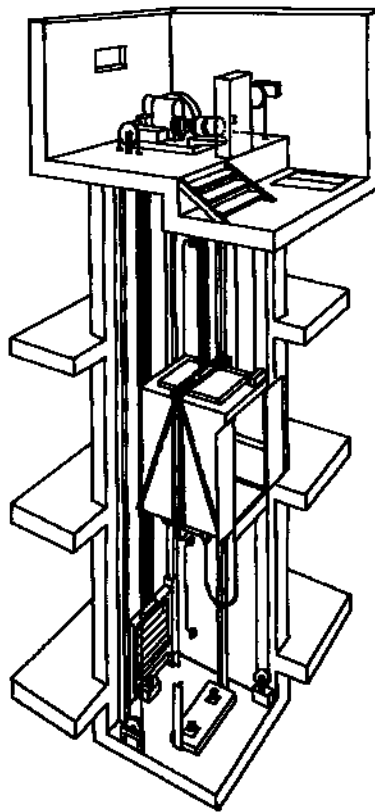


Figura 3.17. Fuente de ruido interna: ascensores, cabinas, cables y caja del ascensor.

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 aíse 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.

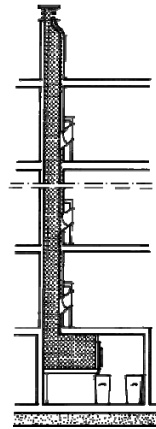


Figura 3.18. Fuente de ruido interna: equipo de vertederos de basuras.

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.

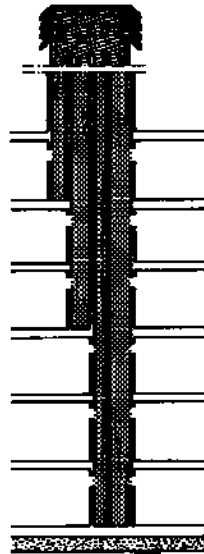


Figura 3.19. Fuente de ruido interna: instalaciones de ventilación.

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.



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.

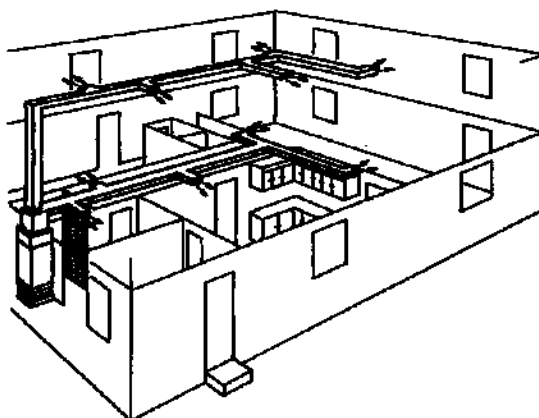


Figura 3.20. Fuente de ruido interna: instalaciones de climatización.

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.

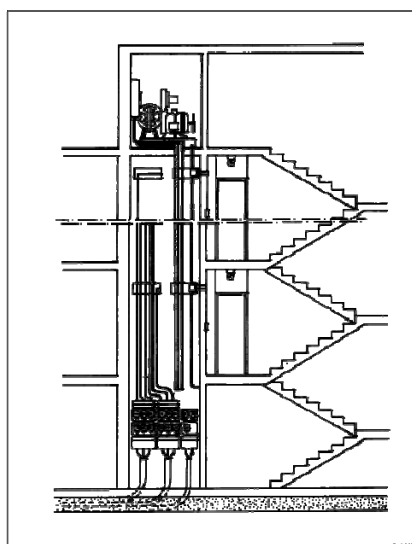


Figura 3.21. Fuente de ruido interna: instalaciones eléctricas.



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.

3.3. Transmisión del sonido a través de tabiques

Si a una pared llega una potencia acústica **Pot₁**, del otro lado ésta radia una potencia acústica **Pot₂**, siempre menor que **Pot₁** (figura 3.22). El **coeficiente de transmisión**, τ , se define como

$$\tau = \frac{\text{Pot}_2}{\text{Pot}_1}.$$

Más útil desde el punto de vista de las aplicaciones es la **pérdida de transmisión**, **PT**, que se expresa en **dB** y se define como

$$\text{PT} = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = 10 \log_{10} \frac{\text{Pot}_1}{\text{Pot}_2},$$

Obsérvese que tanto τ como **PT** son independientes del área de la pared considerada. Si el área cambia, tanto **Pot₁** como **Pot₂** se modifican en igual proporción.

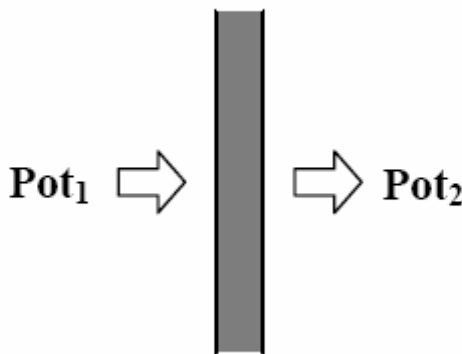


Figura 3.22. Transmisión de energía sonora a través de una superficie.

3.3.1. La ley de la masa

Aunque los mecanismos, cálculos y especificaciones relativos a la pérdida de transmisión se verán en la asignatura "Acústica Arquitectónica", haremos aquí el análisis de un caso sencillo, que es el de un tabique simple con apoyo sin rozamiento. Este análisis será aplicable a paredes simples de menos de **30 cm** de espesor.

Consideremos una fuente plana normal al tabique que produce una presión sonora **p₁(t)**. Nos proponemos calcular la presión **p₂(t)** del otro lado de la pared, ya que disponiendo de los valores de



$p_1(t)$ y $p_2(t)$ podemos calcular la potencia que incide sobre el tabique y la radiada por éste y de allí determinar PT :

$$PT = 10 \log_{10} \frac{I_1 \cdot S}{I_2 \cdot S} = 10 \log_{10} \frac{\frac{P_{1ef}^2}{\rho_0 c}}{\frac{P_{2ef}^2}{\rho_0 c}} = 10 \log_{10} \frac{P_{1ef}^2}{P_{2ef}^2}.$$

La solución general de la P_2 es senoidal de frecuencia f . La relación más importante desde nuestro punto de vista es entre los valores eficaces. El desarrollo matemático queda fuera de la asignatura y se puede encontrar en las referencias de la bibliografía, se obtiene:

$$P_{2ef}^2 = P_{1ef}^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi f \delta}{\rho_0 c} \right)^2}.$$

y aplicando la primera ecuación

$$PT = 10 \log_{10} \left(1 + \left(\frac{\pi f \delta}{\rho_0 c} \right)^2 \right),$$

valido para ondas con ángulo de incidencia normal a la pared.

Este resultado se conoce como **ley de la masa**, y muestra que para frecuencias relativamente altas (donde puede despreciarse el sumando 1 dentro del logaritmo) la pérdida de transmisión crece **6 dB** con cada duplicación de la densidad superficial del tabique. Asimismo, fijada la densidad superficial, la pérdida de transmisión crece con la frecuencia. Esta es la razón por la cual los sonidos graves (baja frecuencia) atraviesan fácilmente las paredes, y en cambio los agudos (alta frecuencia), no. Así, es común que de la música a gran volumen en una vivienda vecina se perciban principalmente la percusión y algunos instrumentos graves como el bajo, y en cambio se pierda casi totalmente la melodía, en general a cargo de instrumentos de tesitura más aguda.

Lo más habitual es que el campo sonoro del lado emisor sea aproximadamente difuso, por lo cual lo más recomendable sería utilizar un promedio para los diversos ángulos. Se comprueba que para diversos valores de $f \delta$ se obtienen promedios que están cerca de

$$PT = PT_0 - 6 \text{ dB},$$

donde PT_0 es el valor para incidencia normal.

En la práctica los valores que se obtienen son todavía menores que lo que predice la ecuación corregida por el efecto del campo difuso, obteniéndose la siguiente ecuación empírica,¹⁰:

¹⁰ Esta ecuación es un ejemplo, existen otras diferentes con un valor aproximado en las fuentes bibliográficas.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

$$PT = 18 \log_{10} \frac{f \delta}{300} ,$$

donde f está en **Hz** y δ en **kg/m²**. Esta ecuación es válida sólo para valores moderadamente altos de $f \delta$. En la figura 3.23 se comparan la curva teórica para incidencia normal y la empírica para campo difuso. En la tabla 3.2 se dan las densidades de varios materiales.

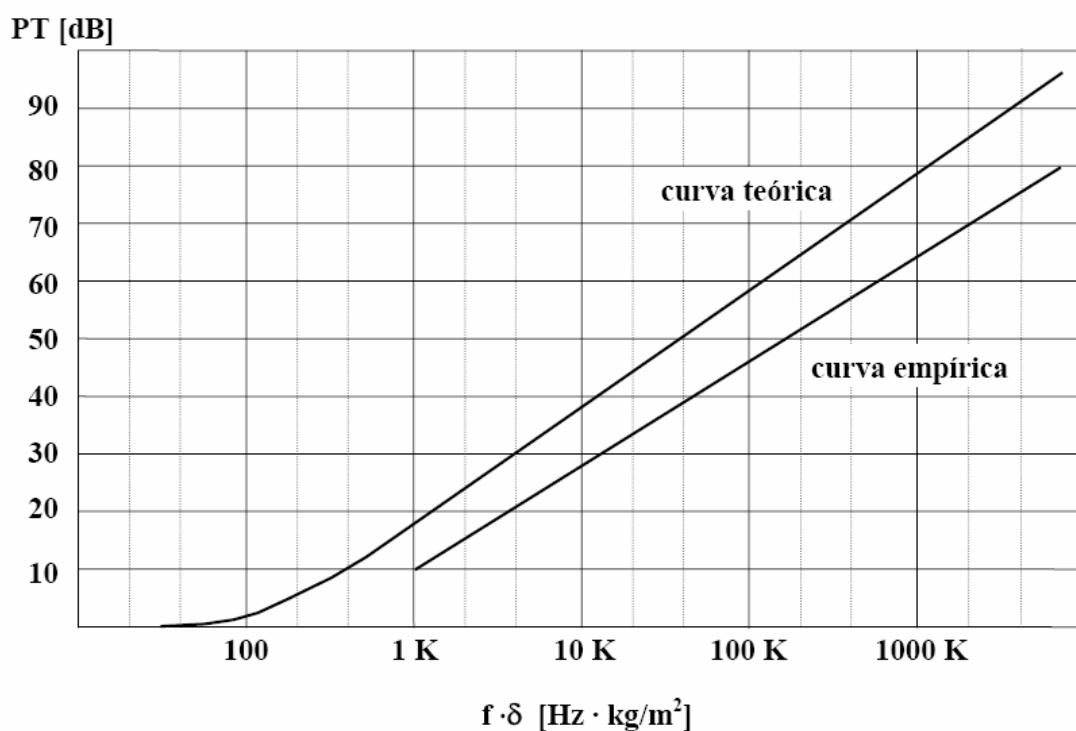


Figura 3.23. Curvas teórica y empírica correspondiente a la ley de la masa. La curva teórica se ha obtenido para incidencia normal.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Tabla 3.2. Densidades de varios materiales típicos.

MATERIAL	DENSIDAD [kg/m ³]
Hormigón	2.400
Ladrillo	1.600 - 2.400
Placa de Yeso	1.200 -1.300
Aldrillo (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

EJEMPLO 3.4

Obtener la pérdida de transmisión de una plancha de **1 mm** de plomo para una frecuencia de **1000 Hz**.

Solución: En este caso, $\delta = 11.300 \times 0,001 \text{ kg/m}^2 = 11,3 \text{ kg/m}^2$. 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 aislación acústica 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..

Cabe aclarar que los resultados que se obtienen en forma directa por aplicación de la ecuación de la ley de masas dependen de que pueda garantizarse que la transmisión se produce sólo a través del material, y no a través de **flancos** o caminos **laterales**. Por ejemplo, podría suceder que en una instalación, el sonido en un ambiente genere vibraciones en la estructura que se propagan a través de



la estructura hasta alcanzar una pared o gran superficie en el recinto receptor que incremente la radiación sonora respecto a la que predice la ley de la masa. Otra limitación aparece con relación al denominado **efecto de coincidencia**, que estudiaremos en la asignatura “Acústica Arquitectónica”.

También es importante tener en cuenta que la pérdida de transmisión es un parámetro con el cual se especifica un determinado material o estructura desde el punto de vista de su capacidad como aislador acústico, pero ello no significa que pueda utilizarse para calcular directamente la diferencia entre los niveles de presión sonora en los recintos transmisor y receptor, según veremos en la sección 3.3.3. Así, si en una habitación hay un nivel de presión sonora de **90 dB** y la pared que la separa de otra habitación posee una pérdida de transmisión de **40 dB**, el nivel de presión sonora en la segunda habitación debido a la filtración sonora *no necesariamente* es **90 dB – 40 dB = 50 dB**.

3.3.2. Pérdida de transmisión compuesta

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** y un área **S_i**, nos proponemos obtener la pérdida de transmisión equivalente de todo el tabique (figura 3.24). Para ello tengamos en cuenta que si del lado expuesto a la fuente (recinto emisor) se recibe una potencia acústica total **Pot**, la potencia acústica recibida por cada material será

$$Pot_i = Pot \frac{S_i}{S},$$

donde **S** es el área de la pared. Por consiguiente, la potencia **Pot_i'** radiada hacia el recinto receptor por cada material resulta ser

$$Pot_i' = \tau_i Pot \frac{S_i}{S} = 10^{-\frac{PT_i}{10}} Pot \frac{S_i}{S}.$$

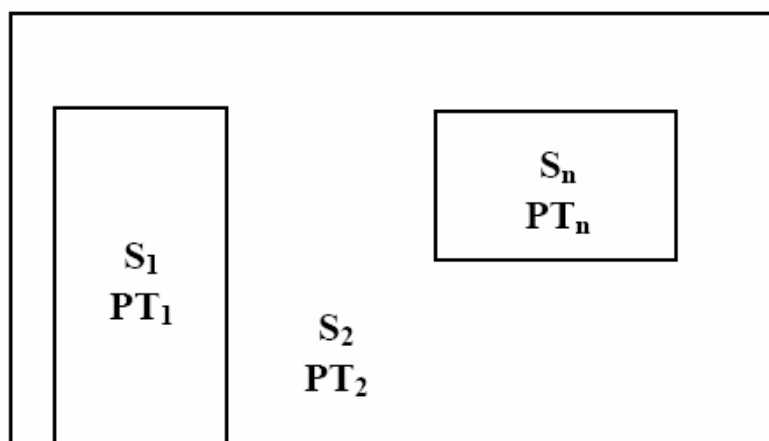


Figura 3.24. Un tabique compuesto por la yuxtaposición de varios materiales o estructuras con diversas propiedades aislantes.



Sumando estas potencias parciales puede obtenerse la potencia acústica total radiada por el tabique hacia el recinto receptor:

$$Pot' = \sum_{i=1}^n 10^{-\frac{PT_i}{10}} \frac{S_i}{S} Pot ,$$

y de allí,

$$PT = 10 \log_{10} \frac{Pot}{Pot'} = 10 \log_{10} \frac{S}{\sum_{i=1}^n S_i 10^{-\frac{PT_i}{10}}} .$$

EJEMPLO 3.5

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**.

Solución: 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

$$\delta_H = 2.400 \cdot 0,1 \text{ kg/m}^2 = 240 \text{ kg/m}^2 ,$$

$$\delta_V = 0 .$$

Con estos valores, resulta

$$PT_H = 52 \text{ dB} ,$$

$$PT_V = 0 .$$

Finalmente,

$$\begin{aligned} PT &= 10 \log_{10} \frac{15}{14,94 \cdot 10^{-\frac{52}{10}} + 0,06 \cdot 10^{-0}} = \\ &= 10 \log_{10} \frac{15}{\underbrace{0,000094}_{\text{hormigón}} + \underbrace{0,06}_{\text{ventiluz}}} = 24 \text{ dB} \end{aligned}$$

Vemos que la gran aislación del hormigón se pierde debido a la existencia de la ventana. Más aún, podríamos haber colocado una pared de **10 cm** de plomo macizo y no habríamos obtenido ninguna mejora. Veremos en la asignatura “Acústica Arquitectónica” que esta situación es bastante frecuente, y podría sintetizarse en lo siguiente: una pequeña superficie sin aislamiento acústico puede



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

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.

3.3.3. Pérdida de transmisión y nivel de presión sonora

Desde el punto de vista práctico, más interesante que la pérdida de transmisión es la relación entre los niveles de presión sonora NPS_1 y NPS_2 en los recintos emisor y receptor (ver figura 3.25). A primera vista puede parecer que la diferencia entre dichos niveles de presión sonora debería ser igual a la pérdida de transmisión, pero no es así. El motivo es esencialmente el mismo que lleva a que una fuente sonora determinada pueda generar campos acústicos con mayor o menor nivel de presión sonora según las características del recinto en el cual se la ubique.

Para el análisis, se supone que el campo es difuso en ambos recintos, y que el nivel de presión sonora en cada recinto se promedia en las zonas en que el campo directo no es predominante (lejos de la fuente y de las paredes).

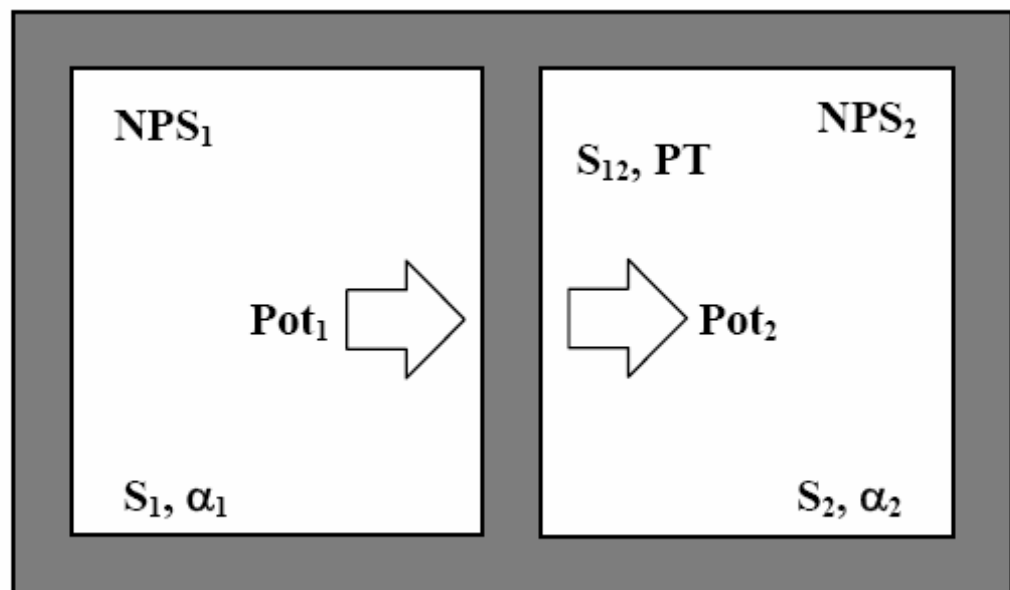


Figura 3.25. Diagrama para el cálculo del nivel de presión sonora en el recinto receptor cuando media un tabique divisorio entre dos recintos.

Calculemos, en primer lugar, la potencia Pot_1 que incide sobre el tabique. Si el campo sonoro fuera plano, entonces su intensidad sería $P_{ef}^2/\rho_0 c$, y entonces tendríamos que $Pot_1 = S_{12} P_{ef}^2/\rho_0 c$. Pero como el campo es, *en realidad, difuso*, existen cancelaciones que hacen que la potencia incidente sea menor. Para calcular dicha potencia supondremos que $\bar{\alpha}$ es pequeño y despreciaremos el campo directo. La ecuación del campo reverberante es, entonces,



$$P_{1ef}^2 = \rho_0 c \frac{4}{\bar{\alpha}_1 S_1} \text{Pot} ,$$

donde **Pot** es la potencia acústica radiada por la fuente en el recinto emisor, la cual puede despejarse para obtener:

$$\text{Pot} = \frac{P_{1ef}^2}{4\rho_0 c} \bar{\alpha}_1 S_1 .$$

Esta potencia radiada por la fuente, una vez alcanzado el estado estacionario debe igualarse a la que es absorbida por las paredes, es decir

$$\text{Pot} = \bar{\alpha}_1 \text{Pot}_{\text{incidente}} .$$

Resultando

$$\text{Pot}_{\text{incidente}} = \frac{P_{1ef}^2}{4\rho_0 c} S_1 .$$

Lo que acabamos de calcular es la potencia que incide sobre *la totalidad* de las superficies del recinto emisor. De ésta, una fracción S_{12}/S_1 incide sobre el tabique limítrofe entre los dos recintos, de manera que

$$\text{Pot}_1 = \frac{P_{1ef}^2}{4\rho_0 c} S_{12} .$$

Ahora que disponemos del valor de la potencia que incide sobre el tabique, podemos aplicar la definición de pérdida de transmisión para obtener la potencia que atraviesa el tabique hacia el recinto receptor:

$$\text{Pot}_2 = 10^{-\frac{PT}{10}} \text{Pot}_1 = 10^{-\frac{PT}{10}} \frac{P_{1ef}^2}{4\rho_0 c} S_{12} .$$

Ahora podemos aplicar la ecuación del campo reverberante en el recinto receptor

$$P_{2ef}^2 = \rho_0 c \frac{4}{\bar{\alpha}_2 S_2} \text{Pot}_2 ,$$

de donde

$$P_{2ef}^2 = 10^{-\frac{PT}{10}} P_{1ef}^2 \frac{S_{12}}{\bar{\alpha}_2 S_2} \quad (5.123)$$

En decibelios,



$$\text{NPS}_2 = \text{NPS}_1 - \text{PT} + 10 \log_{10} \frac{S_{12}}{\alpha_2 S_2}$$

La ecuación anterior muestra que el nivel de presión sonora en el recinto receptor puede ser igual, mayor o menor que el que se obtendría simplemente restando la pérdida de transmisión. El valor depende no sólo del nivel de presión sonora en el recinto emisor y de la pérdida de transmisión del tabique, sino también de las características geométricas y acústicas del receptor. Así, si el tabique es muy pequeño ($S_{12} \ll S_2$), como por ejemplo una ventanilla, NPS_2 resultará menor. Si en cambio es moderadamente grande, como una pared principal o un cielorraso, una absorción pequeña puede incrementar NPS_2 .

Dado que en muchos casos es más fácil determinar el tiempo de reverberación que la absorción, la ecuación anterior puede expresarse en la forma

$$\text{NPS}_2 = \text{NPS}_1 - \text{PT} + 10 \log_{10} \frac{T_2 S_{12}}{0,161 V_2} .$$

Esta ecuación se utiliza para determinar **PT** a partir de datos fácilmente medibles:

$$\text{PT} = \text{NPS}_1 - \text{NPS}_2 + 10 \log_{10} \frac{T_2 S_{12}}{0,161 V_2} ,$$

EJEMPLO 3.6

Determinar la **PT** de una muestra de tabique de placa de yeso doble de **2,5 m × 2,5 m** si al colocarla entre dos cámaras reverberantes se obtienen los resultados siguientes: **NPS₁ = 102 dB**; **NPS₂ = 75 dB**. La cámara receptora tiene una área de **43 m²** y un tiempo de reverberación **T₂ = 6,5 seg**.

Solución:

$$\text{PT} = 102 - 75 + 10 \log_{10} \frac{6,5 \cdot 6,25}{0,161 \cdot 43} = 35\text{dB} .$$

La pérdida de transmisión es unos **8 dB** mayor que la diferencia entre los niveles de presión sonora en ambas cámaras.

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA (T4)

INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA DE AMBIENTAL Y URBANÍSTICA

Fundamentos de Acústica

Edición 2011-2012

Profesor: Juan M. Navarro

UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN ANTONIO DE MURCIA



Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. EMISORES DE RUIDO AMBIENTAL	4
2.1. El ruido de tráfico rodado.....	4
2.2. El ruido de ferrocarriles.....	8
2.3. El ruido de aeronaves.....	12
2.4. El ruido en la construcción.....	13
2.5. Actividades clasificadas no industriales.....	14
2.6. Actividades industriales	15
2.7. Actividades comunitarias	15
3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PROPAGACIÓN DEL RUIDO	16
3.1. Acción del viento y la temperatura.....	16
3.2. Atenuación causada por obstáculos naturales.....	16
3.3. Atenuación causada por obstáculos artificiales.....	17
4. ÍNDICES DE VALORACIÓN DE RUIDO.....	19
4.1. Índices de valoración de diferentes fuentes de ruido	20
4.2. Índices de valoración del ruido de tráfico de vehículos automóviles.....	22
4.3. Índices de valoración del ruido de aviones.....	23
4.4. Otros índices de valoración del ruido	24
5. IMPACTO ACÚSTICO EN EL MEDIO AMBIENTE.....	36
5.1. Técnicas de predicción	38
5.2. Modelos predictivos experimentales para ruido de tráfico	38
5.2.1 Definición de la fuente de ruido.....	40
5.2.2 Características topográficas del lugar y de propagación del sonido	41
5.2.1 Resumen pasos a seguir para la predicción de nivel	45



1. INTRODUCCIÓN

El ruido afecta a los seres humanos físicamente, psicológicamente y socialmente. La exposición durante largos intervalos de tiempo a niveles sonoros elevados puede causar efectos nocivos sobre la salud humana tales como: molestias provocadas por el ruido, alteración del sueño, interferencia con la comunicación oral, efectos negativos sobre el aprendizaje, pérdida de la audición, bajo rendimiento en el trabajo, estrés o hipertensión..... Desde muy antiguo han existido prohibiciones en materia de ruido, pues además de ser un factor de distorsión ecológico, influye en el bienestar y la convivencia pacífica de los ciudadanos.

El **control del ruido** comprende los métodos para obtener un entorno de ruido aceptable para un receptor de acuerdo con consideraciones económicas y operativas; el receptor puede ser una persona, un grupo de personas, una comunidad completa o una pieza del equipamiento cuyo funcionamiento se ve afectado por el ruido. Cuando se emplea la palabra aceptable surgen preguntas como las siguientes: ¿aceptable bajo qué condiciones? ¿aceptable por quién? Debido a la complejidad de las consideraciones económicas y operativas implicadas y a que todos los elementos pueden cambiar con el tiempo, no suele haber una respuesta única para tales preguntas en un problema de ruido determinado

En los últimos años muchos países han ido implantando legislaciones sobre control del ruido y éste se ha convertido en un asunto de creciente importancia social y económica, dando lugar a multitud de métodos técnicos en control. En España, en particular se ha implantado el Documento Básico de Control del Ruido dentro del nuevo Código Técnico de la edificación y la Ley del Ruido. Por ejemplo, una melodía sonando a todo volumen en la radio puede resultar muy agradable para una familia en su casa, pero es una molestia para los vecinos que están intentando dormir, no es deseada, es ruido. Por definición, el ruido es un sonido no deseado.

Por otro lado, el ruido es un problema de gran importancia económica en la sociedad actual:

- cuando el nivel de ruido en las instituciones empresariales o educaciones es lo suficientemente alto como para interferir con la comunicación hablada, se producen pérdidas económicas. El mundo de los negocios realiza grandes esfuerzos para lograr condiciones de silencio en oficinas y fábricas
- el efecto del ruido sobre el valor de la propiedad: el ruido del funcionamiento de un aeropuerto o una fábrica influye sobre el valor del suelo que rodea la zona

El ruido es un problema de gran importancia económica en la sociedad moderna. Cuando se tiene un nivel de ruido suficientemente alto como para interferir con la comunicación hablada en locales de negocios o de educación, hay unas pérdidas económicas sustanciosas. En los juzgados hay actualmente muchas reclamaciones de indemnizaciones por un valor muy elevado como resultado de pérdidas permanentes de audición. Otro aspecto de la importancia económica del ruido se presenta bajo la forma de su influencia sobre el valor de las propiedades. Por ejemplo, el ruido debido a un aeropuerto o a una fábrica cercana puede influir en el valor de las propiedades próximas. Por razones económicas, la industria está haciendo un considerable esfuerzo para desarrollar productos silenciosos, y el mundo de las industrias intenta lograr condiciones silenciosas en oficinas y fábricas. Aunque no siempre resulta posible establecer relaciones explícitas entre el ruido y sus efectos sobre los humanos, o para los científicos demostrar, en este momento, que algunos de estos



efectos incluso existen, tiene una importancia significativa que las empresas y las industrias estén gastando anualmente cantidades considerables de dinero para lograr ambientes de silencio. Se puede argumentar que este incremento es el resultado de un éxito promocional; en cierta forma esto es cierto, y lo mismo ocurre con la mayoría de los productos del mercado. Por otra parte, este rápido crecimiento se puede tener en cuenta simplemente pensando que a las personas no les gusta el ruido, les incomoda, les perturba, el ruido es una molestia pública. Muchos negocios encuentran que sus clientes presentan objeciones al ruido. Además, sus empleados prefieren no trabajar en un entorno ruidoso. A las personas les gusta el silencio, generalmente están dispuestos a pagar por él.

La acústica medioambiental y en concreto la acústica urbanística está constituida por el conjunto de técnicas y métodos cuyo objetivo es crear el ambiente sonoro adecuado, en los diversos espacios exteriores habitados por el hombre.

La contaminación es la liberación artificial de sustancias o energías que causan efectos adversos sobre el hombre o sobre el medio ambiente, directa o indirectamente. Entre los diferentes tipos de contaminación, el ruido es quizás el menos estudiado debido a su complejidad en la evaluación y el control. Protegiendo los espacios exteriores frente al ruido, se protege también los espacios interiores de las edificaciones, ya que se reduce el nivel en sus fachadas, permitiendo con el mismo un aislamiento, reducir el nivel de ruido en el interior.

Aunque en la presente asignatura, la secuencia de exposición de temas comienza por el acondicionamiento y el aislamiento y finaliza con la problemática acústica en el exterior (estudio y evaluación del impacto ambiental), criterios de eficiencia aconsejan que el orden de intervención en el tiempo sea exactamente el contrario. Por lo tanto el control del ruido ambiental se convierte en el primer eslabon en la cadena de lucha contra el ruido.

2. EMISORES DE RUIDO AMBIENTAL

Se puede definir la contaminación acústica como la existencia de ruido o vibraciones producidos por cualquier tipo de foco emisor, que impliquen riesgo, daño o molestia para las personas, el desarrollo de sus actividades y bienes de cualquier naturaleza, o perjuicio para el medio ambiente. Según la Directiva Europea 2002/49/CE el **ruido ambiental** es el sonido no deseado o nocivo generado por la actividad humana en el exterior, incluido el ruido emitido por medios de transporte, emplazamientos industriales o edificios industriales.

El conocimiento de las fuentes de ruido exteriores e interiores a los edificios es importante para la ubicación de estos y determinar el aislamiento acústico exigible en los edificios en función de su uso. La situación y disposición de los volúmenes de edificación en el planeamiento urbanístico y los cerramientos del edificio deben estar en consonancia con las fuentes de ruido en el medio circundante.

2.1. El ruido de tráfico rodado

El ruido producido por el tráfico rodado se ha convertido en las últimas décadas en la fuente de ruido que afecta a mayor número de personas. El ruido de tráfico urbano e interurbano es el resultado de la contribución de diferentes fuentes individuales de ruido (automóviles, camiones, autobuses, motos...) todas ellas tienen diferentes espectros y características de emisión. Por otra parte, hay que tener en consideración el estado de la calzada, las características geométricas de las calles por las que se circula....



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Un vehículo aislado es considerado como fuente puntual, las diferencias de niveles al doblarse la distancia a la fuente (6dB). Se define la huella sonora como la variación del nivel de presión sonora a una determinada distancia cuando se desplaza en movimiento por delante del medidor sonoro.

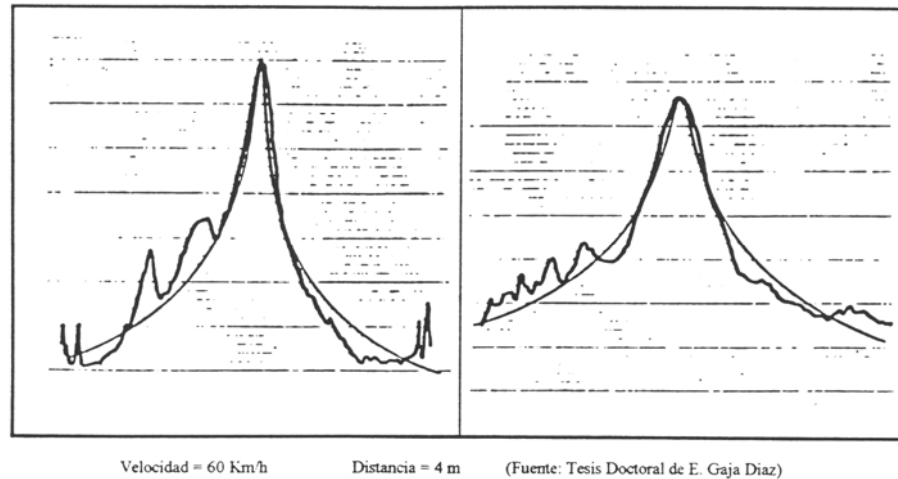


Figura 4.1. Huella sonora de un vehículo aislado.

Con respecto a la directividad puede considerarse que es omnidireccional en la mayor parte de su espectro de emisión.

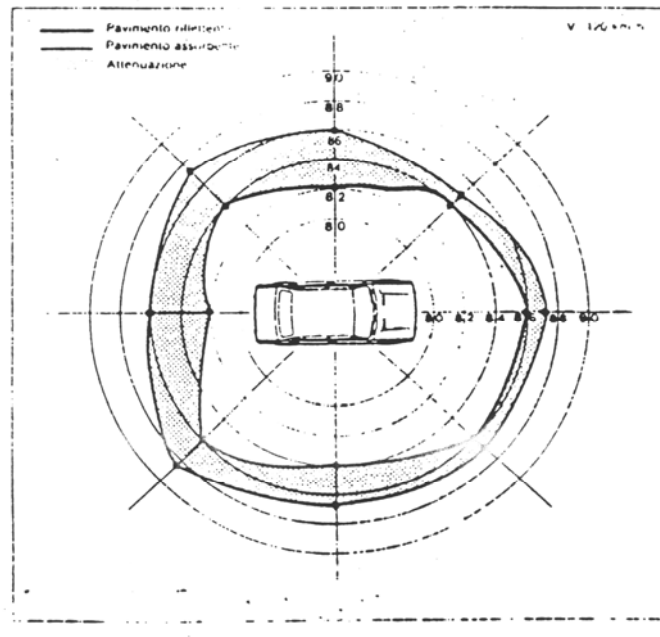


Figura 4.2. Directividad de un vehículo aislado.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

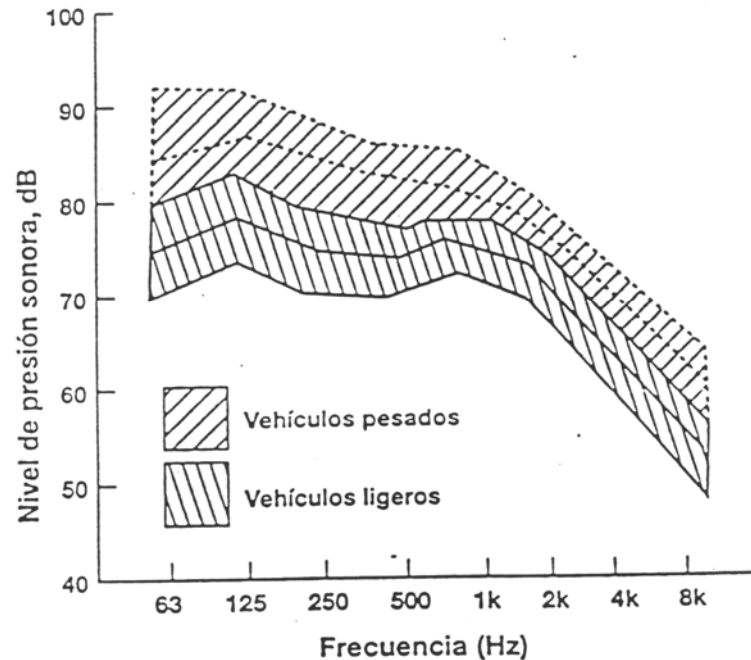


Figura 4.3. Espectro típico de un vehículo aislado pesado y ligero.

El ruido de un vehículo en circulación es el resultado de la superposición de los diversos ruidos producidos por el motor, sistemas de transmisión, neumáticos, carrocería, sistema de escape, sistemas de aire acondicionado..... Por otro lado, los niveles de presión sonora producidos por el tráfico rodado dependen entre otras cosas, del porcentaje de vehículos pesados, pues estos son más ruidosos que el resto de los vehículos.

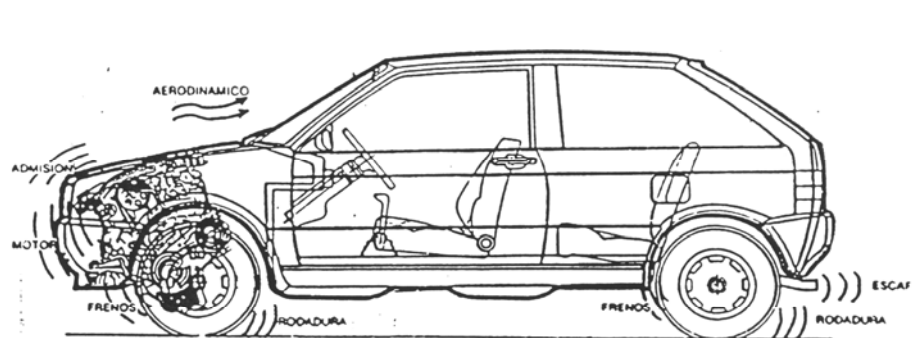


Figura 4.4. Diversas fuentes de ruido de un vehículo.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Los ruidos producidos por la rodadura

En los vehículos ligeros el ruido del motor a baja velocidad, a alta velocidad en altas relaciones, el ruido de rodadura puede ser igual o mayor que el mecánico. En vehículos pesados con motor diesel predomina el ruido de motor, escape y ventilador en la mayoría de las condiciones de funcionamiento.

Cuanto más desgastados están los neumáticos, más ruidoso suele ser el vehículo, cuanto mayor sea la resistencia al deslizamiento del pavimento, mayores son los niveles de ruido producidos.

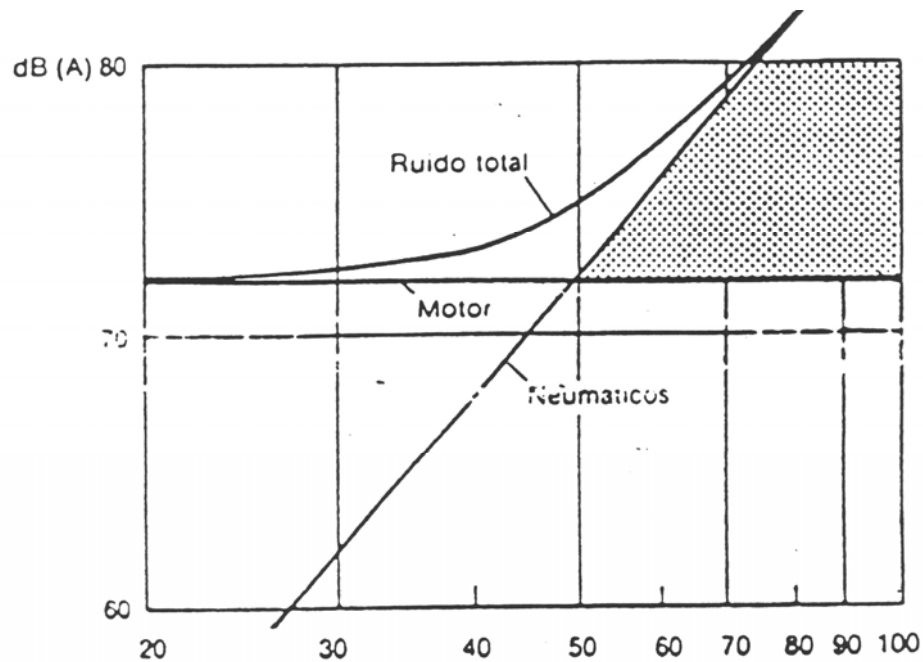


Figura 4.5. Comparativa ruido motor y neumáticos en función de la velocidad de un vehículo.

Fuentes de ruido mecánico.

Producidos por el sistema de ventilación del motor, por el escape de gases, el funcionamiento del carburador y el motor de explosión.

Un estudio en Alemania obtuvo los resultados siguientes:

- ☐ Nivel de ruido debido al motor: 82,5 dBA
- ☐ Nivel de ruido debido a las ruedas: 78 dBA
- ☐ Nivel de ruido debido al viento: 78,6 dBA



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

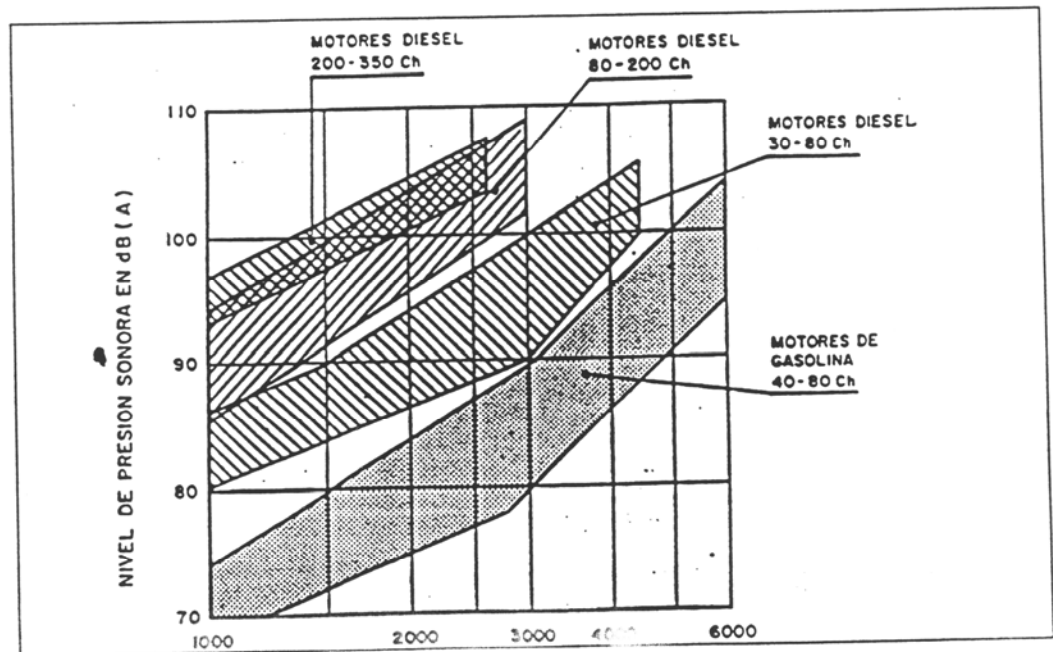


Figura 4.6. Gráfica comparativa de ruidos de vehículos con diferente motorización.

Fuentes de ruido aerodinámica

Por la fricción del aire contra el vehículo en marcha, muy importante para velocidades superiores a los 80 Km/h, y está influenciado por el coeficiente de penetración al aire (coeficiente C_x)

Una de las innovaciones para mejorar la seguridad y comodidad en el tráfico de vehículos en las vías de circulación en días de lluvia fue la utilización de materiales porosos, estos permiten el drenaje del agua hacia los márgenes de la carretera y una mejora de la visibilidad durante la conducción al disminuir las reflexiones de la luz sobre el pavimento. Desde el punto de vista acústico la colocación de pavimentos porosos disminuye el ruido de rodadura de los vehículos y aumenta la absorción acústica del pavimento, con lo que disminuye los niveles sonoros en las proximidades de las vías de circulación. Se comprueba experimentalmente que a velocidades superiores a 70 km/h, el espesor óptimo del pavimento es de 40 mm para tener la mayor absorción acústica en el rango más amplio de frecuencias. La atenuación acústica de un asfalto poroso en buen estado de mantenimiento medido al lado de la carretera es en general del orden de 3-5 dB ponderados A.

2.2. El ruido de ferrocarriles

El ferrocarril es uno de los medios de transporte más efectivo. Con el aumento de la población en las grandes ciudades y el transporte de productos ha aumentado de forma espectacular el número de operaciones ferroviarias y en consecuencia el impacto acústico del ferrocarril. Las molestias producidas por el ruido de los ferrocarriles de superficie de una zona dependen del número de trenes que circulen.



El espectro de frecuencias de los niveles sonoros producidos por los trenes es característico y se distingue fácilmente de los originados por otros medios de transporte, predominan las altas frecuencias debido a que la causa principal es la interacción entre la rueda y el rail aunque también están los ruidos por ejemplos ligados al sistema de propulsión de vagones y locomotoras, a su equipamiento auxiliar... El ferrocarril subterráneo no contribuye a aumentar los niveles sonoros ambientales, pero puede ocasionar en los edificios situados en su proximidad niveles molestos de ruidos y vibraciones. Su directividad no corresponde al de una fuente omnidireccional, ya que existen grandes diferencias en la propagación en planos verticales, perpendiculares a la vía. La causa es que la carrocería de los vagones hace de pantalla al ruido producido por la rodadura.

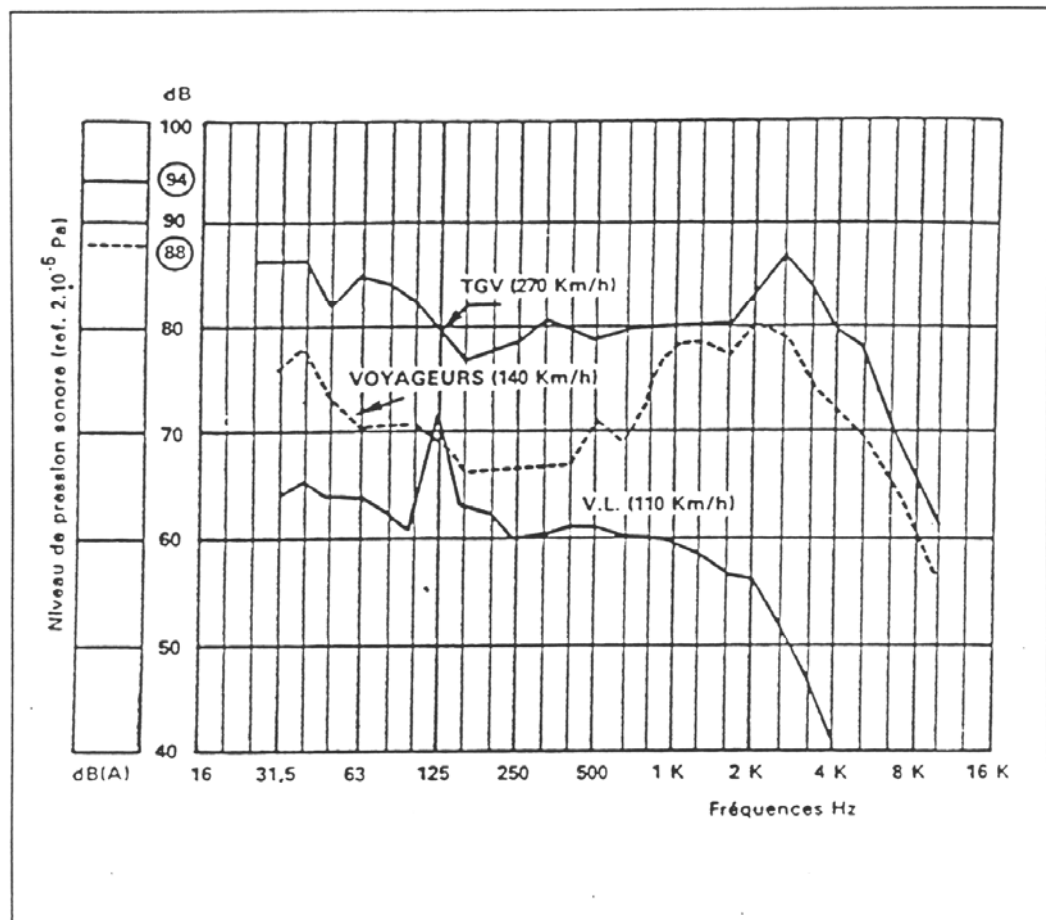


Figura 4.7. Espectro sonoro de diferentes tipos de trenes de mercancías.

Se conoce con el nombre de firma acústica de un tren, a la evolución del nivel de presión sonora en un punto, producido por el paso de un tren en el transcurso del tiempo. Habitualmente se expresa con ponderación A. Una característica común a todas ellas es la forma trapezoidal de la envolvente que consta de:

- 1) Parte inicial con una pendiente pronunciada, que varía con la velocidad de aproximación del tren y la distancia del punto de medición a la vía.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

- 2) Una meseta, producida por el paso del tren frente al punto de medición, depende del número de locomotoras y vagones del tren. El nivel de presión sonora en la meseta se llama L_{Amax} , medido en dB ponderados A, también depende del tipo de tren, de su velocidad y de la distancia de la vía al punto de medición.
- 3) Parte final, debida al alejamiento del tren, con un decrecimiento más lento.

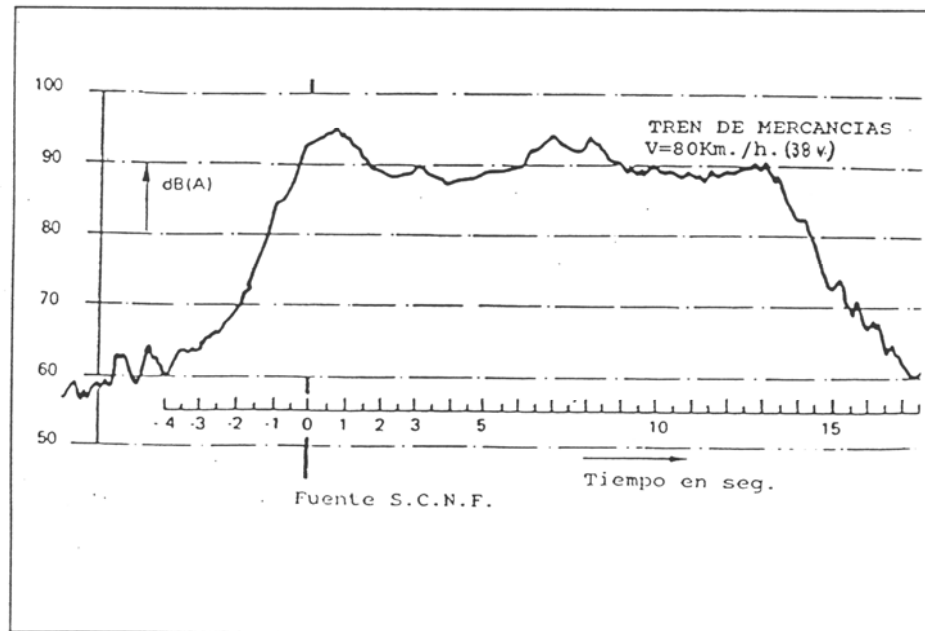


Figura 4.8. Firma sonora de un tren de mercancías.

FUENTES DE RUIDO

Rodadura: provocada por el conjunto rueda-rail.

Mecánico: debido a la unidad tractora del tren.

Aerodinámico: solamente es perceptible para velocidades muy elevadas.

Algunos valores aproximados del nivel de presión sonora en la meseta, L_{Amax} en trenes franceses y españoles se indican en la siguiente tabla:



Tipos de trenes	Velocidad, km/h	L_{Amax} dB	
		$d_0 = 7,5$ m	$d_0 = 25$ m
Cercanías	100		79
Cercanías	120		81
Rápidos	200	104	97
Expresos	140	97	92
Correos	100	96	89
Mercancías	80	93	86
ETG	155	96	91
TVG	270	105	97
Trenes españoles			
AVE	300		94,5
TALGO	200		96

Tabla 4. 1. Niveles de presión sonora en la meseta, L_{Amax} en trenes franceses y españoles

TREN	Leq (1 h)	
	sin señales acústicas	con señales acústicas
UE	46,7	59,6
UTA	50,0	65,4
UT447	52,5	62,8
INTERCITY	60,7	67,7
ELEC 440	58,0	66,7
TALGO	57,3	60,3
DIESEL	50,5	60,1

Tabla 4. 2. Niveles de presión sonora equivalente en 1 hora en trenes franceses y españoles.

El metro es un caso especial de ruido ferroviario donde el problema que se puede presentar es la propagación por **vibraciones**.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

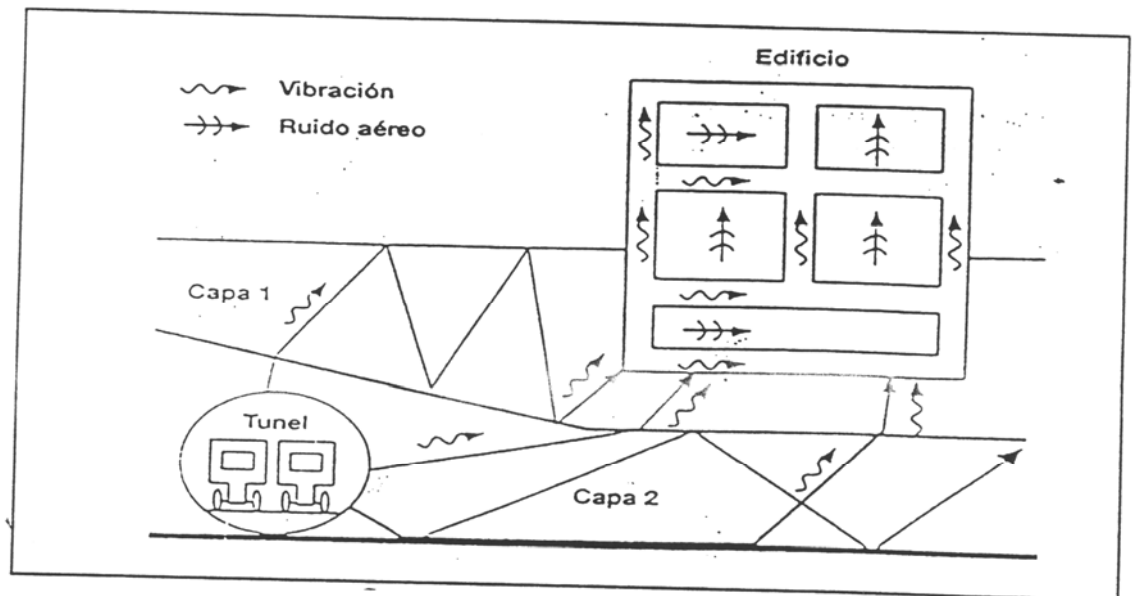


Figura 4.9. Transmisión de ruido por vibración generado por metro.

2.3. El ruido de aeronaves

De todos los medios de transporte, los aviones son los que emiten mayor cantidad de energía acústica, lo que unido a su dependencia de los aeropuertos hace que las molestias que se ocasionan en las localidades situadas en sus inmediaciones sean verdaderamente importantes.

De forma general, los niveles máximos de ruido producidos por un avión se producen en la operación de despegue, pues se exige a los motores el máximo de potencia; le sigue en importancia el sobrevuelo, y por último, el aterrizaje, en esta última operación el nivel de los ruidos generado es del orden de 20 dB superior al de vuelo normal. La duración del sobrevuelo en la operación de despegue es mucho mayor que en el aterrizaje.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

	L_{eq}	Tpo exp	MAXL	MAXP
BOING	69,8	8,5	70,3	78,5
DC9	71,6	7,2	75,1	87,3
AIRBUS	64,3	6,8	70,2	75,3
cn235	61,2	10,1	71,3	81,1

Tabla 4. 3. Ruta de aproximación de los aviones a unos 50 m de altura. Niveles expresados en dBA y tiempo de exposición en segundos

2.4. El ruido en la construcción

La causa más importante de ruido en la construcción se debe a la maquinaria empleada en la misma, generalmente de gran tamaño, que origina unos ruidos de carácter continuo, con un amplio rango de niveles y con componentes impulsivas. Tampoco es desdeñable el ruido producido por vehículos pesados que traen o llevan material a la obra.

Los ruidos que produce la construcción dependen de las características de la fase en que se encuentre la misma. Según sus características acústicas, la Agencia del Medio Ambiente estadounidense establece cinco fases consecutivas en la construcción:

- 1) Preparación del terreno, incluyendo la demolición de la estructura existente.
- 2) Excavación.
- 3) Cimentación, incluyendo reacondicionamiento de firmes, compactación y entibación de zanjas.
- 4) Levantamiento de estructura, forjados, tabiques, ventanas y conducciones en general.
- 5) Terminación, incluyendo pavimentación y limpieza.

Las fases de excavación y de terminación son las más ruidosas.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

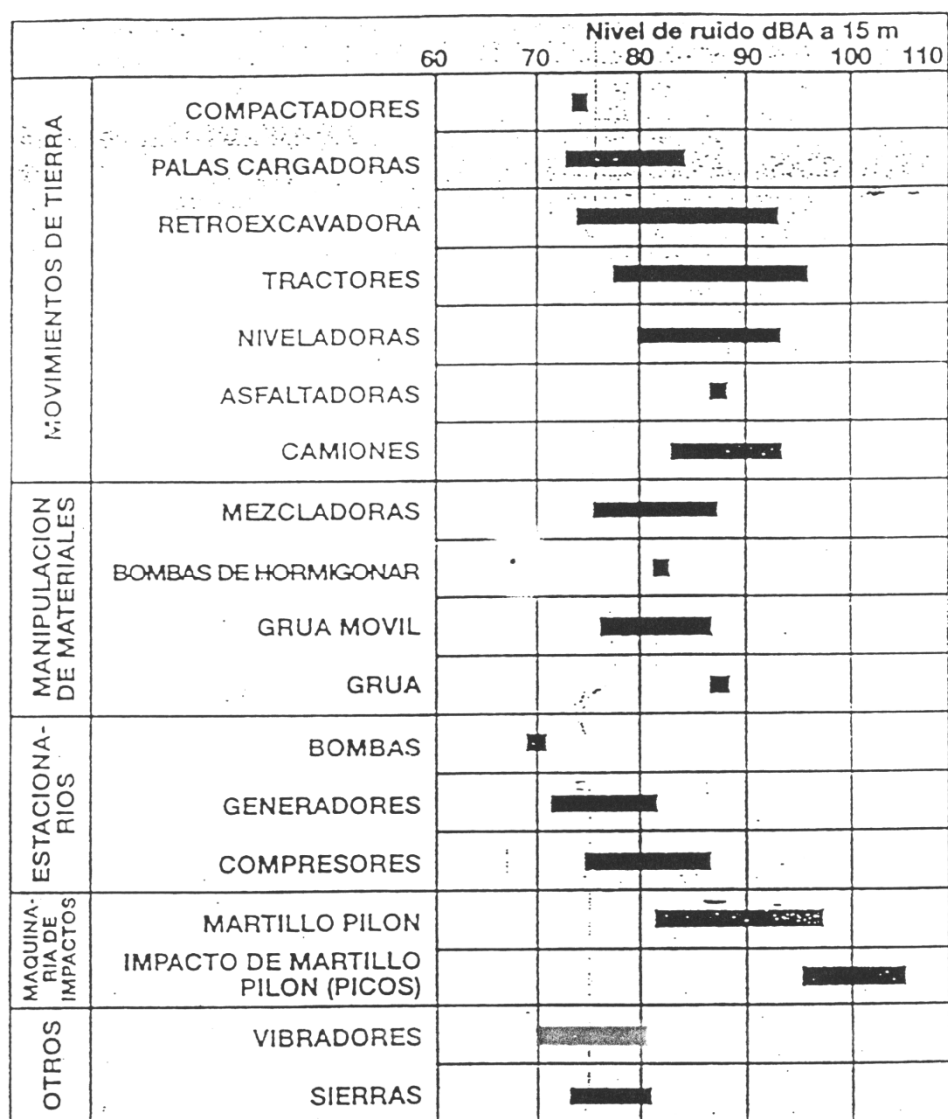


Figura 4.10. Niveles de ruido generados por maquinaria pesada en las operaciones típicas de construcción.

2.5. Actividades clasificadas no industriales

Fundamentalmente pubs y discotecas, están adquiriendo más importancia en las grandes ciudades y zonas veraniegas.

- El ruido emitido en el interior de los locales (música) afecta a las viviendas colindantes.
- El ruido emitido en el exterior de los locales que desarrollan estas actividades.



- Un agravante de esta problemática es la hora en la cual se desarrollan estas actividades.

Unos estudios realizados en varias ciudades costeras de la comunidad valenciana indican que:

- 1- Los niveles de ruido ambientales nocturnos en las zonas medias superan en la mayoría de los casos a los niveles diurnos en zonas de tráfico elevado.
- 2- La causa de estos niveles de ruido no es imputable directamente a la mayoría de los locales, sino a la aglomeración de juventud en ciertas zonas debido a la excesiva concentración de los locales de estas características.
- 3- Estos niveles de ruido son totalmente incompatibles con las recomendaciones internacionales sobre máximos niveles de ruido nocturnos recomendados.
- 4- El descanso nocturno de los ciudadanos que viven en estas zonas, es prácticamente imposible en especial los fines de semana a partir de las 0 horas hasta las 4 o 5 horas.

2.6. Actividades industriales

El nivel equivalente en la mayoría de las mediciones apenas supera los 60 dBA.

Como conclusiones obtenidas de algunos estudios podemos decir que:

- 1- En la totalidad de las poblaciones afectadas, los niveles de ruido ambientales producidos por la industria que afectan a la población apenas supera los 60 dBA.
- 2- En la mayoría de los casos, la industria está lo suficientemente alejada de la población como para no producir molestias.
- 3- Existen casos particulares, de pequeños talleres situados en los bajos de edificios de viviendas, en los cuales las molestias se producen en el interior de dichas viviendas, pero no al medio ambiente objeto de este estudio

2.7. Actividades comunitarias

Incluye todas aquellas fuentes sonoras que funcionan para satisfacer las necesidades de una comunidad (electrodomésticos, ascensores, recogida de basuras, colegios.....).

Tomando como referencia la NBE-CA-88, se citan como fuentes más habituales las siguientes:

- Mercados y locales comerciales.
- Reparto urbano de mercancías.
- Locales de espectáculos.
- Colegios.
- Ruido de equipos e instalaciones comunitarias.

Tal y como se presentó en el tema anterior, podemos hacer una sencilla clasificación:

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



3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PROPAGACIÓN DEL RUIDO

El estudio de la propagación del ruido, y en especial cuando ésta tiene lugar en áreas urbanas, es un proceso bastante complejo que depende de varios factores. Así, para conocer en cualquier punto el nivel sonoro producido por una fuente acústica situada a una cierta distancia de dicho punto, es necesario tener en cuenta, entre otros, los siguientes factores:

- La divergencia de las ondas sonoras.
- La absorción atmosférica.
- La acción del viento y la temperatura.
- La atenuación causada por obstáculos naturales.
- La atenuación causada por obstáculos artificiales.

Los dos primeros factores han sido estudiados a lo largo de los primeros temas de la asignatura, por lo que pasaremos a explicar los otros.

3.1. Acción del viento y la temperatura

El gradiente de la temperatura y el viento son dos factores que afectan a la propagación del sonido de forma sensible, y puede dar lugar a atenuaciones o reforzamientos del nivel sonoro según el gradiente sea positivo o negativo, o según la dirección del viento.

Si existe una inversión de temperaturas (gradiente positivo), como la velocidad del sonido aumenta con la temperatura, la parte superior de los frentes de onda se moverán más rápidamente que la parte inferior, produciéndose una inclinación de los rayos sonoros hacia el suelo. Si el gradiente de temperaturas fuese negativo, el efecto sería el opuesto, creándose unas zonas de sombra en las que los niveles sonoros serían sensiblemente inferiores.

La acción del viento sobre la propagación del sonido es parecida a la ocasionada por el gradiente negativo de la temperatura, pero en el caso del viento sólo aparece una zona de sombra en el lado desde el que sopla.

3.2. Atenuación causada por obstáculos naturales

Dentro de los obstáculos naturales se incluyen el terreno y todo tipo de vegetación capaz de interferir en la propagación del sonido. En la propagación del sonido, las ondas sonoras sufren reflexiones en el terreno a lo largo de su recorrido, de ahí la importancia de la naturaleza del mismo.

Si el terreno es compacto la atenuación será prácticamente nula para distancias fuente-receptor inferiores a 100 m. Sin embargo, si presenta alguna porosidad o está recubierto de césped o de algún tipo de vegetación uniforme, la atenuación puede llegar a ser apreciable, especialmente a altas frecuencias. En la tabla siguiente se dan algunos valores orientativos de la atenuación causada por el terreno cubierto de distintos tipos de vegetación, para una frecuencia de 1000 Hz.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Tipo de recubrimiento	Atenuación dB/100m a 1000Hz
Ninguno	2 - 5
Hierba escasa	3 - 6
Arbustos	12 - 15
Césped tupido	15 - 20

Tabla 4. 4. Atenuación causada por el terreno en función del grado de vegetación sobre el mismo.

3.3. Atenuación causada por obstáculos artificiales

En este apartado se analiza el efecto de las pantallas acústicas y de los edificios sobre la propagación del sonido. Estas pantallas constituyen uno de los elementos más efectivos en la reducción del ruido generado por algunos tipos de fuentes sonoras.



Se entiende por pantalla acústica toda barrera o pared no porosa de suficiente masa (mínimo de 20 kg/m^2) situada entre la fuente y el receptor. En la siguiente figura se muestra un esquema de una pantalla acústica, supuestamente infinita, con las diferentes distancias necesarias para la obtención del número de Fresnel.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

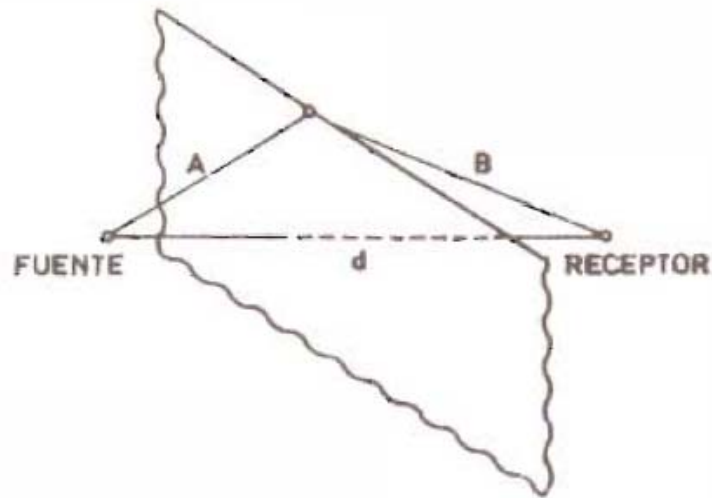


Figura 4.11. Pantalla acústica. Medición de la distancias.

La atenuación del sonido emitido por una fuente puntual, debido a una pantalla rígida en función del denominado número de fresnel, Δ , se muestra en la figura siguiente. Notar que el número de Fresnel es negativo cuando el receptor puede ver a la fuente.

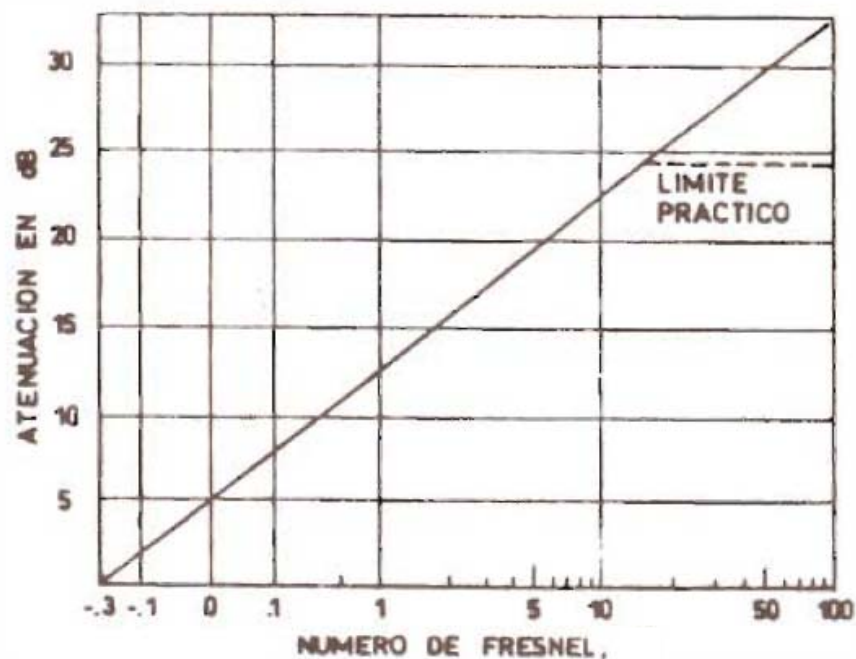


Figura 4.12. Atenuación debida a una pantalla en función del número de fresnel.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

El número de Fresnel viene dado por,

$$\Delta = 2 (A+B-d)/\lambda.$$

donde,

λ , es la longitud de onda del sonido, en metros.

d, es la distancia entre la fuente y el receptor, en metros.

A+B, es el camino mínimo recorrido por la onda acústica entre la fuente y el receptor, en metros.

Como se observa en la figura 4.12. prácticamente la atenuación máxima que se puede alcanzar es de unos 24 dB.

Los edificios se pueden considerar también pantallas acústicas, diversos estudios indican que:

- En zonas residenciales abiertas, la atenuación causada por los edificios es de unos de 10 dBA.
- En zonas residenciales densas, la atenuación puede alcanzar los 20 dBA.
- Como norma general se puede tomar que la atenuación es de:
 - o 13 dBA por el primer bloque de edificios.
 - o 6 dBA por el segundo bloque de edificios.
 - o Despreciable por la presencia de un tercer bloque.

En este punto hay que tener en cuenta que en el caso de que existan edificios a ambos lados de la fuente sonora, sin discontinuidad alguna, se produce el denominado “efecto cañón”, que incrementa hasta en 10 dBA, el nivel sonoro. También se produce otro efecto de “fachada”, que puede aumentar el nivel sonoro en unos 2-3 dBA en puntos próximos a las fachadas de los edificios.

4. ÍNDICES DE VALORACIÓN DE RUIDO

En el Tema 3 anterior se presentaron las principales fuentes de ruido tanto internas como externas a la edificación. Según se ha podido deducir de todo lo expuesto anteriormente los seres humanos se encuentran rodeados por el ruido en todas sus actividades, por lo que si se desea conocer y valorar la reacción de una persona o de un colectivo, ante el ruido, es necesario crear una escala que relacione la respuesta subjetiva de las personas, con alguna propiedad física medible de la fuente sonora (potencia emitida, intensidad en un punto situado a una distancia de la fuente, presión acústica en un punto situado a una distancia de la fuente), mediante un único valor numérico que llamaremos **Índice**.

De esta forma se podrán crear **Criterios**, que nos darán valores del índice de ruido que no deben superarse. La comparación de los valores medidos de un índice, en un caso determinado de ruido, con los máximos valores admitidos, diremos que es hacer una **Evaluación** del ruido estudiado.

El propósito de los diferentes trabajos, dentro de este tema, consiste en conocer las características físicas del ruido, y combinarlas para obtener una unidad que permita predecir cómo



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

van a reaccionar los seres humanos, frente a un problema determinado de ruido. Existen muchas características de ruido, de las que conoce la molestia que origina, por ejemplo un ruido intermitente, o si tiene tonos puros identificables, es mucho más molesto que un ruido de intensidad análoga pero estable.

Para encontrar los valores de los índices de evaluación, se necesitan hacer diferentes tomas de datos:

1. una medida única,
2. conocer el espectro de frecuencias,
3. análisis estadístico en el tiempo y,
4. combinación de las medidas anteriores.

En la evaluación de los diferentes tipos de ruidos, debe tenerse en cuenta, que un índice válido para evaluar uno, no servirá para predecir otro tipo de ruido, ya que entre ambos ruidos pueden existir importantes variaciones en sus características físicas.

Debido a lo expuesto, los métodos de evaluación del ruido pueden dividirse en dos grandes grupos:

1. realiza una descripción de las características físicas del estímulo acústico;
2. normaliza los métodos teniendo en cuenta factores externos no acústicos.

4.1. Índices de valoración de diferentes fuentes de ruido

1. Nivel de presión acústica en toda la banda.
Nivel sin ponderar en el rango de frecuencias audibles.
2. Nivel de presión acústica ponderado.
 - 1) Ponderación A: escala de medida de niveles, establecida mediante el empleo de la curva de ponderación A (Norma UNE 21.314/75, para compensar diferencias de sensibilidad que el oído humano tiene para las distintas frecuencias dentro del campo auditivo (sigue aproximadamente a la curva isofónica de 40 fonos) dB (A).
 - 2) Ponderación B: sigue aproximadamente a la isofónica de 70 fonos dB(B).
 - 3) Ponderación C: sigue aproximadamente a la isofónica de 100 fonos dB(C)



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

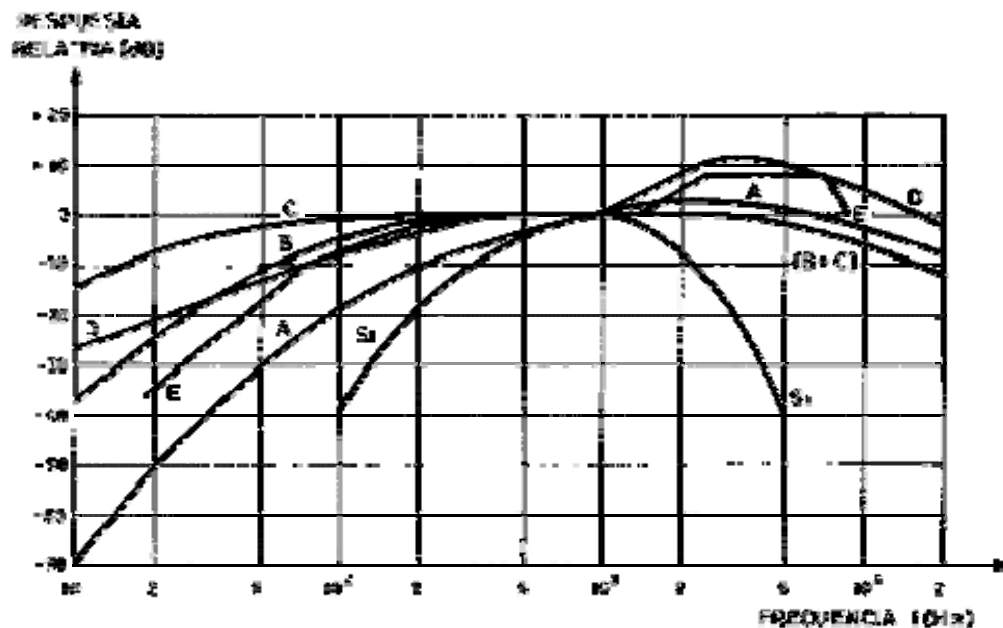


Figura 4.13 Curvas de ponderación estandarizadas internacionalmente.

Tabla 4. 5. Niveles típicos de sonido dados con ponderación A .

Fuentes de ruido interior	Medida	Nivel de presión acústica dBA
1. Bombas de circulación	-	90
2. Vaciado y llenado de aparatos sanitarios	-	75
3. Compuerta de vertido de basuras	en su interior	80
4. Calderas y quemadores	-	70-90
5. Rejillas aerodinámicas	-	40
6. Reactancias y fluorescentes	-	60
7. Relés de conmutación	-	60
8. Lavaplatos	-	90



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

9. Frigoríficos	-	35
10. Lavadoras	-	70
11. Pisadas	-	55
12. Conservaciones nivel normal	-	70
13. Conservaciones nivel medio	-	76
14. Conservaciones nivel fuerte	-	100
15. Equipos de reproducción sonora	-	65-90
16. Instrumentos musicales	-	90-100
17. Juegos infantiles	-	60
18. Arrastre de muebles	-	65
19. Persianas enrollables	-	65
20. Ladrado de perros	-	80

4.2. Índices de valoración del ruido de tráfico de vehículos automóviles

3. Nivel sonoro continuo equivalente L_{eq} .

Es el nivel en dB(A) de un ruido constante hipotético, correspondiente a la misma cantidad de energía que el ruido real considerado, en un punto determinado durante un período de tiempo T:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{p_A}{p_0} \right]^2 dt$$

T: tiempo de medida necesario para la observación p_A : presión acústica instantánea ponderada en A, y p_0 : presión acústica de referencia.

4. Nivel sonoro L_N (Percentil).

Es un índice que se calcula mediante un análisis estadístico del ruido, siendo el nivel de ruido en dB(A), que se ha sobrepasado durante el N% del tiempo de medida.

- 1) L_{10} : es el nivel de presión sonora en dB(A) que se sobrepasa durante el 10% del tiempo de observación (se usa para señalar niveles de pico).
- 2) L_{50} : es el nivel de presión sonora en dB(A) que se sobrepasa durante el 50% del tiempo de observación.



- 3) L_{90} : es el nivel de presión sonora en dB(A) que se sobrepasa durante el 90% del tiempo de observación (se usa para señalar el nivel ambiente).

5. Nivel sonoro promediado día/noche L_{DN} .

Es el L_{eq} durante las 24 horas del día, aumentando 10 dB sobre los ruidos ocurridos durante la noche (22-8 H).

6. Nivel de contaminación sonora L_{NP} .

Es el índice en dB(A) obtenido a partir del nivel de ruido equivalente L_{eq} , teniendo en cuenta la fluctuación de niveles. Tiene la ventaja de valorar la reacción subjetiva al ruido, y los inconvenientes de su obtención por métodos indirectos. Su expresión es:

$$L_{NP} = L_{eq} + 2,56 s \text{ dB(A)}$$

siendo s , la desviación típica.

Si el ruido tiene una distribución gaussiana,

$$L_{NP} = L_{eq} + L_{10} - L_{90}$$

7. Nivel de ruido de tráfico TNI.

Es un índice empírico en dB(A) que tiene en cuenta el valor del nivel L_{90} , así como la dispersión:

$$TNI = 4 (L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30 \text{ dB(A)}$$

es válido para casos de poca circulación (inferior a 300 vehículos/hora). Para circulaciones medias y altas se puede utilizar:

$$L_{10} = L_{50} + 1,28s \text{ dB(A)}$$

$$L_{90} = L_{50} - 1,28s \text{ dB(A)}$$

$$TNI = L_{50} + 9s - 30 \text{ dB(A)}$$

Este índice tiene la ventaja de que valora más adecuadamente las reacciones humanas que el nivel medio L_{50} , cuando existe poca circulación.

4.3. Índices de valoración del ruido de aviones

8. Nivel de ruido percibido L_{PN} , o nivel de pico.

Es el índice que representa el efecto subjetivo total, producido por el paso de un avión, en función del nivel máximo, de su composición espectral y de la evolución del ruido con el tiempo (se mide en dB).

Otros índices son la sonoridad PN(dB) (ISO 3891), el Nivel de ruido percibido corregido para tonos puros L_{TPN} , y el Nivel de ruido percibido efectivo L_{EPN} .

9. Pronóstico de exposición sonora NEF.

Se utiliza para predecir futuros ruidos de impactos en los alrededores de aeropuertos (tipo de avión, ruta de aproximación, número de vuelos, hora del día, etc).

10. Índice de ruido y número de operaciones NNI.

Sirve para medir el ruido de aviación, tiene en cuenta el número de vuelos durante el periodo de observación y la media de los niveles de pico de ruido (en PN dB).



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

$$NNI = L_{PN} + 15 \log N - 80$$

donde L_{PN} valor medio de los niveles de pico percibidos y N es el número de vuelos.

11. Nivel de exposición al ruido de acontecimientos singulares con ponderación L_{AX} .

Es el nivel que si se mantiene constante durante 1 s, entregaría al receptor la misma energía acústica con ponderación A, que el suceso medido; representa el efecto subjetivo total que produce el paso de un avión en función del nivel de presión máxima en dB(A), en un tiempo de integración de 1 s, y de la evolución del ruido con el tiempo:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\int_{t_1}^{t_2} \frac{[p_A(t)]^2}{p_0^2} dt \right]$$

donde $p_A(t)$ presión acústica instantánea con ponderación A, p_0 presión de referencia, $T_0 = 1$ s;

$$L_{eq} = 10 \log \int_{t_1}^{t_2} 10^{L_A/10} dt$$

$L_A(t)$ nivel de presión acústica instantánea con ponderación A, $t_1 - t_2$ intervalo de tiempo en el que el nivel permanece a 10 dB del máximo:

$$L_{eq} = 10 \log (1/T) \int_{t_1}^{t_2} 10^{L_A/10} dt$$

Si se consideran ahora todos los aviones que salen o llegan al aeropuerto, se debe caracterizar el ruido en un punto del suelo por un nivel medio:

$$L = 10 \log (1/N) \sum 10^{L_{AN}/10}$$

donde L_N nivel máximo en P_N , producido por el n ésimo avión percibido en el punto considerado y N el número total de aviones percibidos en el mismo punto, durante el período en el que se hace la medida (día, mes, año).

4.4. Otros índices de valoración del ruido

12. Curvas de valoración NR.

Permite asignar al espectro en frecuencias de un ruido, medido en bandas de octava, un sólo número NR (ISO R-1.996), que corresponde a la curva que queda por encima de los puntos que representan los niveles obtenidos en cada banda de ruido. La forma de estas curvas refleja el incremento de la sensibilidad del oído con el aumento de la frecuencia y la forma espectral de los ruidos más frecuentes, disminuye con un aumento de la frecuencia.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Tabla 4. 6. Niveles típicos de sonidos dados en diferentes índices de valoración.

Fuentes de ruido exterior	Distancia a la que se da la medida	Índice de valoración
1. Sirena de 50 CV.....	30 m	130-140 dBA
2.Después avión a reacción.....	60 m	120-130 dBA
3.Maquinaria de remachar.....	-	110 dBA
4. Martillo neumático.....	-	100-110 dBA
5. Ferrocarril suburbano.....	6 m	90-100 dBA
6. Maquinaria neumática de taladrar.....	15 m	80-90 dBA
7. Tren de carga.....	30 m	70-80 dBA
8. Ruido de tráfico en calle adoquinada en cuesta con tráfico intenso y 30% de vehículos pesados.....	-	L_{10} = 88 dBA
9. Calle asfaltada hprizontal con tráfico muy intenso y 30% de vehículos pesados.....	-	L_{10} = 82 dBA
10. Calle asfaltada horizontal con tráfico poco intenso y 10% de vehículos pesados.....	-	L_{10} =82 dBA
11. Avión reactor pesado , en aterrizaje.....	2.000 m de la pista	L_{EPN} = 106 dBA L_{AX} = 106 dBA L_{EPN} = 106 dBA
12. Avión reactor de tipo medio en aterrizaje.....	2.000 m de la pista	L_{AX} = 106 dBA L_{EPN} = 106 dBA
13. Avión a reacción.....	a 300 m de altitud	L_{AX} = 106 dBA L_{EPN} = 106 dBA
14. Avión de hélice.....	a 300 m de altitud	L_{AX} = 106 dBA L_{EPN} = 106 dBA



15. Despegue de avión de turbohélice y avión reactor.....	a 500 m de la pista	$L_{AX} = 106$ dBA
16. Tren.....		80-100 dBA
17. Sierras.....	30 m	90 dBA
18. Actividades industriales.....	10 m	80 dBA
19. Mercados, colegios, etc.....	-	90 dBA
20. Agentes atmosféricos.....	-	80 dBA
	-	

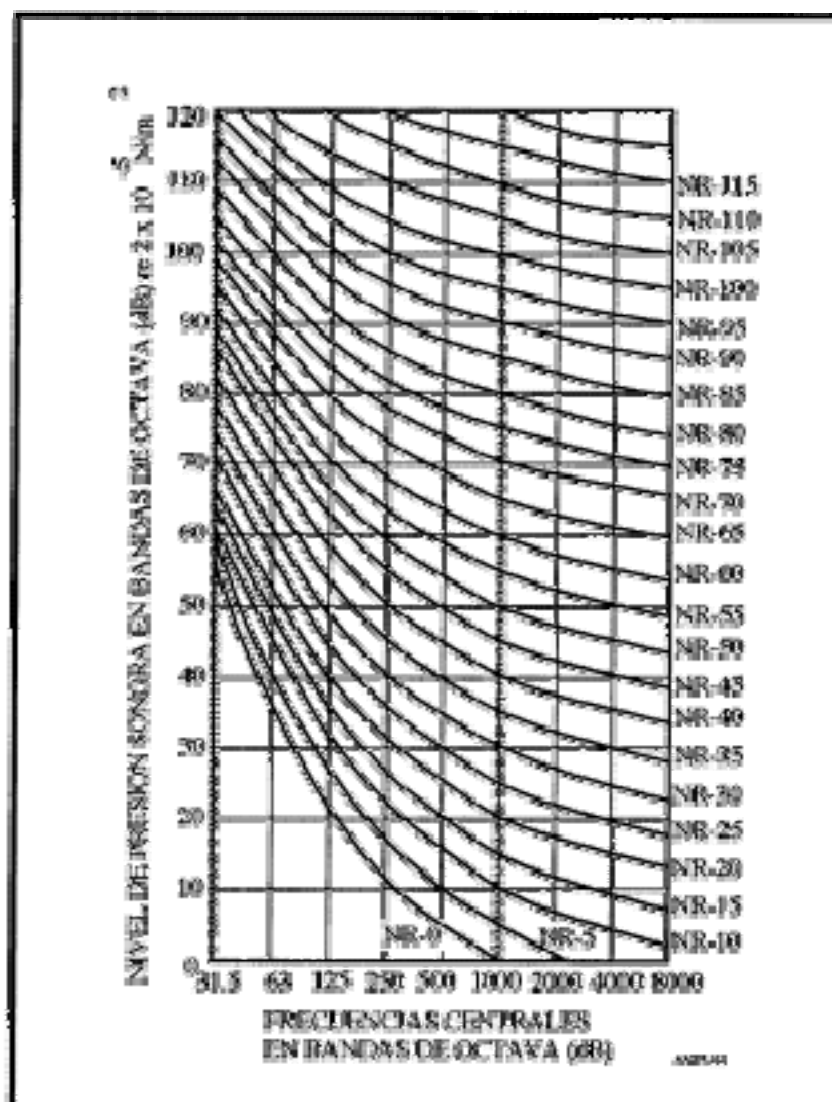


Figura 4.14 Curvas de criterio de ruido NR.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Tabla 4.7. Valores del nivel de presión sonora correspondientes al índice NR.

NR	Niveles de presión sonora en bandas de octava (dB)								
	Frecuencias centrales (Hz)								
	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
0	55,4	35,5	22,0	12,0	4,8	0	-3,5	-6,1	-8,0
5	58,8	39,4	26,3	16,6	9,7	5	1,6	-1,0	-2,8
10	62,2	43,4	30,7	21,3	14,5	10	6,6	4,2	2,3
15	65,6	47,3	35,7	25,9	19,4	15	11,7	9,3	7,4
20	69,0	51,3	39,4	30,6	24,3	20	16,8	14,4	12,6
25	72,4	55,2	43,7	35,2	29,2	25	21,9	19,5	17,7
30	75,8	59,2	48,1	39,9	34,0	30	26,9	24,7	22,9
35	79,2	63,1	52,4	44,5	38,9	35	32,0	29,8	28,0
40	82,6	67,1	56,8	49,2	43,8	40	37,1	34,9	33,2
45	86,0	71,0	61,1	53,6	48,6	45	42,2	40,0	38,3
50	89,4	75,0	65,5	58,5	53,5	50	47,2	45,2	43,5
55	92,9	78,9	69,8	63,1	58,4	55	52,3	50,3	48,6
60	96,3	82,9	74,2	67,8	63,2	60	57,4	55,4	53,8
65	99,7	86,8	78,5	72,4	68,1	65	62,5	60,5	58,9
70	103,1	90,8	82,9	77,1	73,0	70	67,5	65,7	64,1
75	106,5	94,7	87,2	81,7	77,9	75	72,6	70,8	69,2
80	109,9	98,7	91,6	86,4	82,7	80	77,7	75,9	74,4
85	113,3	102,6	95,9	91,0	87,6	85	82,8	81,0	79,5
90	116,7	106,6	100,3	95,7	92,5	90	87,8	86,2	84,7



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

95	120,1	110,5	104,6	100,3	97,3	95	92,9	91,3	89,8
100	123,5	114,5	109,0	105,0	102,2	100	98,0	96,4	95,0
105	126,9	118,4	113,3	109,6	107,1	105	103,1	101,5	100,1
110	130,3	122,4	117,7	114,3	111,9	110	108,1	106,7	105,3
115	133,7	126,3	122,0	118,9	116,8	115	113,2	111,8	110,4
120	137,1	130,3	126,4	123,6	121,7	120	118,3	116,9	115,6
125	140,5	134,2	130,7	128,2	126,6	125	123,4	122,0	120,7
130	143,9	138,2	135,1	132,9	131,4	130	128,4	127,2	125,9

Tabla 4 .8. Valores recomendados del índice NR para diferentes locales.

Tipos de recintos		Rango de niveles NR que pueden aceptarse
Talleres.....		60-70
Oficinas mecanizadas.....		50-55
Gimnasios, salas de deporte, piscinas.....		40-50
Restaurantes, bares, cafeterías.....		35-45
Despachos, bibliotecas, salas de Justicia.....		30-40
Cines, hospitales, iglesias, pequeñas salas de conferencias.....		25-35
Aulas, estudios de televisión, grandes salas de conferencias.....		20-30
Salas de conciertos, teatros.....		20-25
Clínicas, recintos para audiometrías.....		10-20



13. Curvas de valoración NC.

Existe este otro índice, dado por L.L. Beranek en 1957, con el que se pretendió originalmente relacionar el espectro de un ruido con la perturbación que producía en la comunicación verbal, teniendo en cuenta los niveles de interferencia de la palabra y los niveles de sonoridad. La curva NC 20 y 30, así como otras curvas NC, tienen un contorno de forma similar a las curvas NR, pero desplazadas hacia arriba, alrededor de 3 dB, para valores de nivel de presión bajos, (por ejemplo los estudios de grabación sonora).

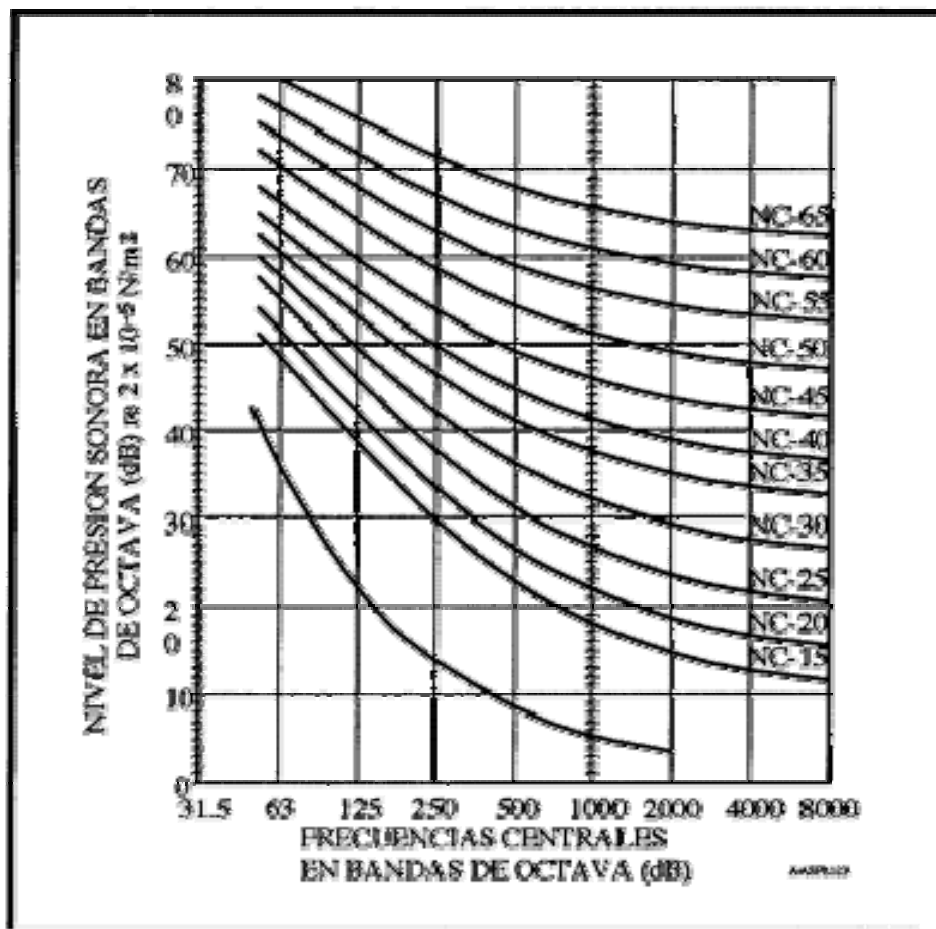


Figura 4.15 Curvas de criterio de ruido NC.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Tabla 4.9. Valores recomendados del índice NC para diferentes locales.

Tipos de recintos	Rango de niveles NC que pueden aceptarse
Fábricas para ingeniería pesada.....	55-75
Fábricas para ingeniería ligera.....	45-65
Cocinas industriales.....	40-50
Recintos deportivos y piscinas.....	35-50
Grandes almacenes y tiendas.....	35-45
Restaurantes, bares, cafeterías, y cafeterías privadas.....	35-45
Oficinas mecanizadas.....	40-50
Oficinas generales.....	35-45
Despachos, bibliotecas, salas de Justicia y aulas.....	30-35
Viviendas, dormitorios.....	25-35
Salas de hospitales y quirófanos.....	25-35
Cines.....	30-35
Teatros, salas de juntas, iglesias.....	25-30
Salas de concierto y teatros de ópera.....	20-25
Estudios de registro y reproducción sonora.....	15-20



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Tabla 4.10. Valores del nivel de presión sonora correspondientes al índice NC.

NC	Niveles de presión sonora en bandas de octava (dB)							
	Frecuencias centrales (Hz)							
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
15	47	36	29	22	17	14	12	11
20	51	40	33	26	22	19	17	16
25	54	44	37	31	27	24	22	21
30	57	48	41	35	31	29	28	27
35	60	52	45	40	36	34	33	32
40	64	57	50	45	41	39	38	37
45	67	60	54	49	46	44	43	42
50	71	64	58	54	51	49	48	47
55	74	67	62	58	56	54	53	52
60	77	71	67	63	61	59	58	57
65	80	75	71	68	66	64	63	62
70	83	79	75	72	71	70	69	68

Tabla 4.11. Valores recomendados del índice PNC para diferentes locales.

Tipos de recintos	Rango de niveles PNC que pueden aceptarse
Salas de concierto, óperas y locales de recitales.....	10-20 10-20



Estudios de radio y de televisión.....	20
Auditorios, grandes teatros, iglesias.....	35
Auditorios pequeños, pequeñas iglesias, pequeños teatros,	25-40
grandes salas de conferencias y	30-40
reuniones.....	35-45
Dormitorios, hospitales, residencias, apartamentos,	40-50
hoteles.....	45-55
Oficinas privadas, pequeñas salas de conferencias, aulas,	50-60
bibliotecas.....	
Grandes oficinas, tiendas, cafeterías,	
restaurantes.....	
Oficinas de ingeniería.....	
Cocinas, lavanderías, oficinas con ordenadores.....	
Grandes tiendas, garajes.....	

14. Curvas de valoración PNC.

A las curvas NC obtenidas en 1957 se le hicieron una serie de sugerencias y modificaciones, que dieron lugar en 1971 a las curvas PNC (Preferred Noise Criteria). Estas curvas PNC tienen valores que son alrededor de 1 dB menos que las curvas NC en las cuatro bandas de octava 125, 250, 500 y 1.000 Hz, para la misma curva. En la banda de 63 Hz, los niveles permisibles son 4 o 5 dB menores; en las tres bandas altas son 4 o 5 dB inferiores. Estas curvas no han sido aceptadas internacionalmente, por lo que se consideran como recomendaciones, aunque se podrán usar igual que las curvas NC.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

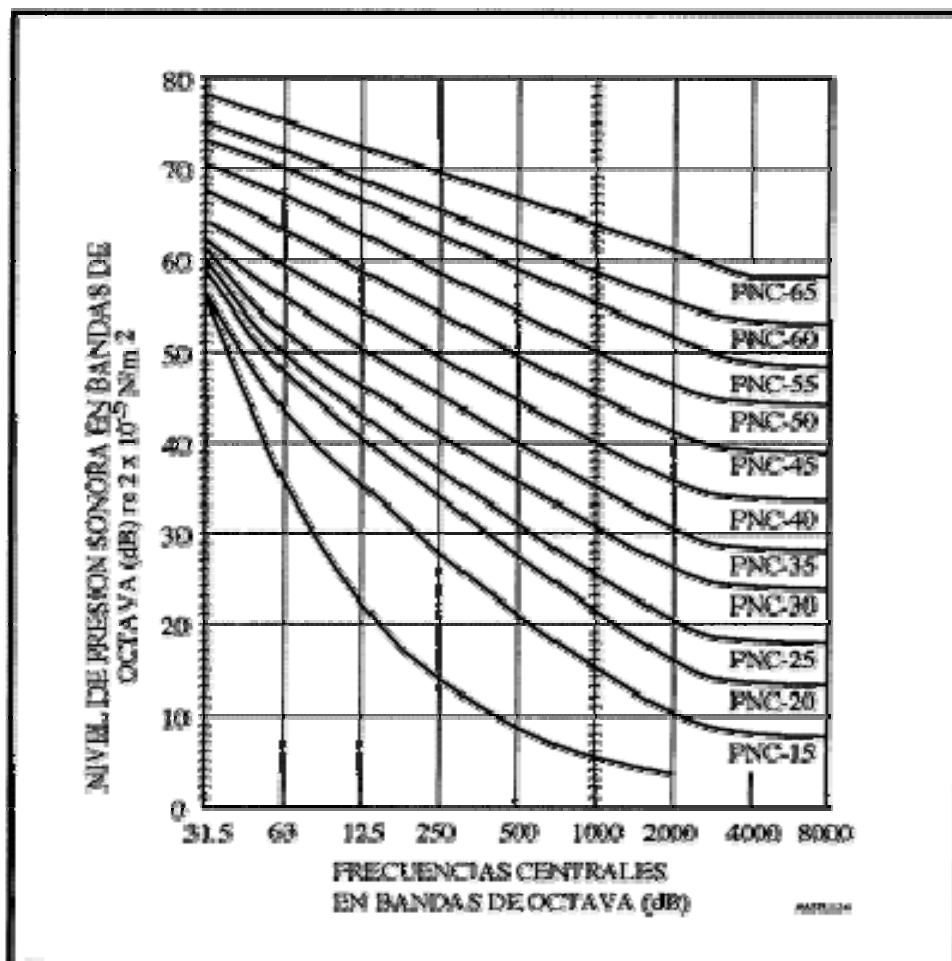


Figura 4.16 Curvas de criterio de ruido PNC.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Tabla 4.12. Valores del nivel de presión sonora correspondientes al índice PNC.

PNC	Niveles de presión sonora en bandas de octava (dB)							
	Frecuencias centrales (Hz)							
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
15	43	35	28	21	15	10	8	8
20	46	39	32	36	20	15	13	13
25	49	43	37	31	25	20	18	18
30	52	46	41	35	30	25	23	23
35	55	50	45	40	35	30	28	28
40	59	54	50	45	40	35	33	33
45	63	58	54	50	45	41	38	38
50	66	62	58	54	50	46	43	43
55	70	66	62	49	55	51	48	48
60	73	69	66	63	59	56	53	53
65	76	73	70	67	64	61	58	58

15. Niveles de interferencia de conversación SIL, PSIL.

El Índice Speech Interference Level (SIL) es la media aritmética de los niveles de presión a las bandas 600-1.200 Hz; 2.400 - 4.800 Hz.

El Índice Preferred Speech Interference Level (PSIL) es la media aritmética de los niveles de presión acústica en las bandas con centro en 500, 1.000 y 2.000 Hz.

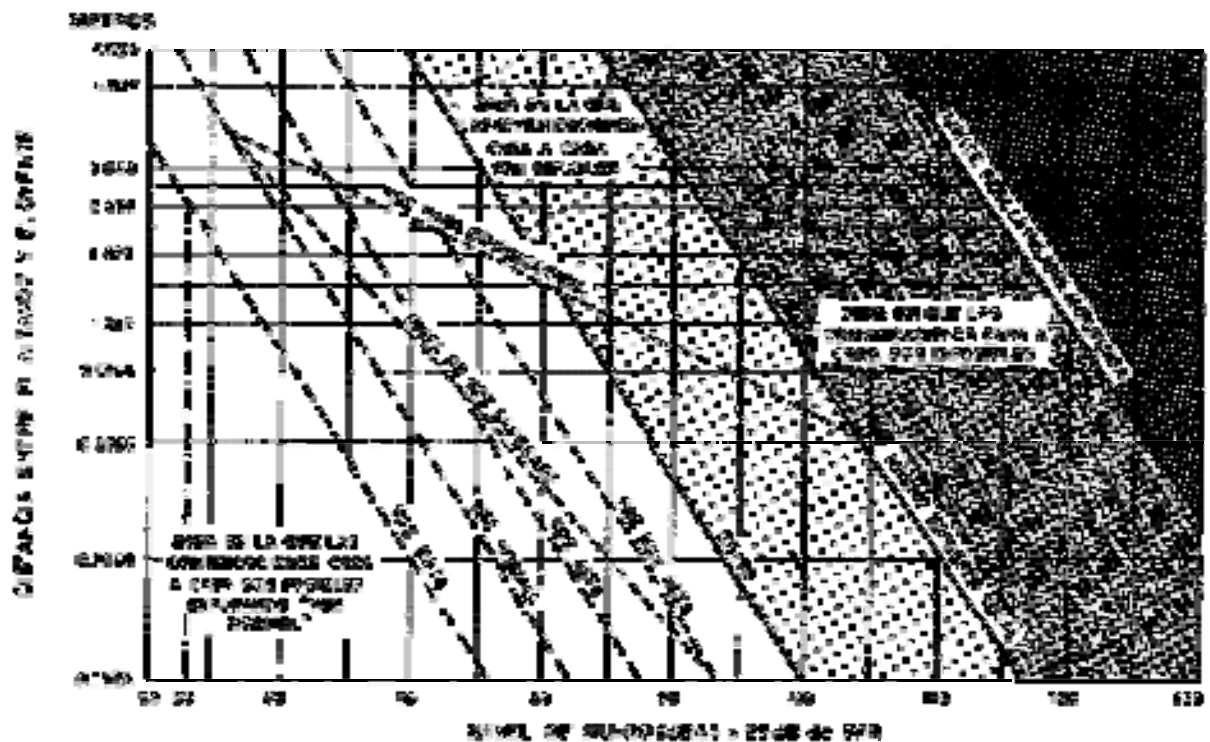


Figura 4.17. Límites de comunicación en presencia de ruido de fondo.

5. IMPACTO ACÚSTICO EN EL MEDIO AMBIENTE

En acústica urbanística es imprescindible la localización y evaluación de las diversas fuentes de ruido, existentes o en proyecto, tanto para predecir el grado de molestia originado por las mismas, como para proponer medidas correctoras.

En esta evaluación conviene distinguir entre:

- Los **estudios de impacto acústico medio-ambiental** de un determinado proyecto urbano, consistentes en la previsión de la incidencia de las fuentes de ruido proyectadas, así como del análisis de las posibilidades naturales de protección frente al ruido originado.
- Los **mapas sonoros** de un determinado espacio urbano, ya existente, que grafían una distribución de niveles sonoros representativa de la situación real media. Asimismo, contemplan las zonas caracterizadas por niveles punta, especificando las bandas de valores de estos niveles y su distribución en el tiempo. Para que el mapa sonoro sea un instrumento valioso, no sólo para el análisis sino también para el diagnóstico y establecimiento de criterios para adoptar posibles soluciones, debe identificar y evaluar los focos sonoros que constituyen mayoritariamente al excesivo



nivel de ruido. El conocimiento de la distribución en frecuencias del ruido en cuestión, puede resultar imprescindible, tanto para tomar medidas correctoras como para predecir el grado de molestia del ciudadano.

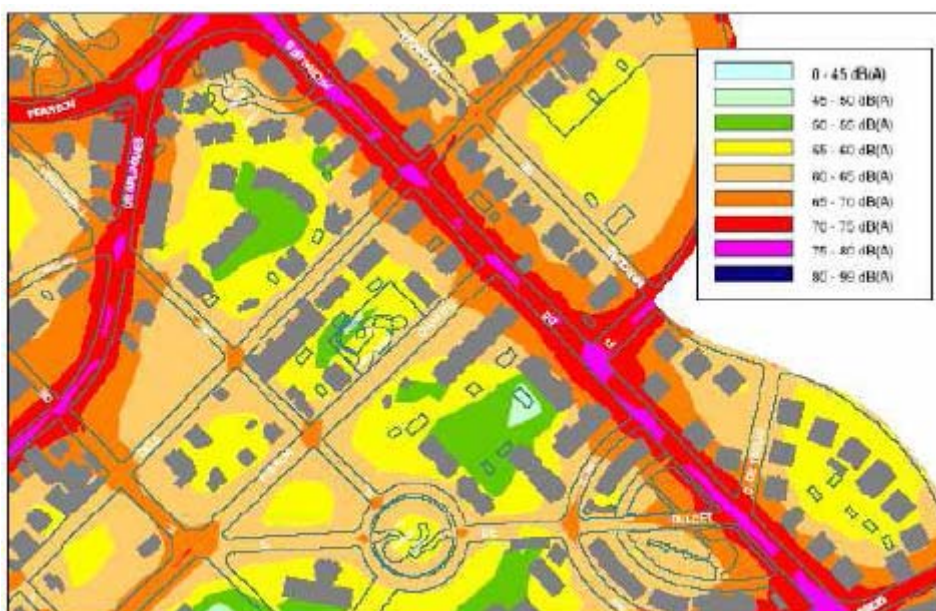


Figura 4.18. Representación de mapa sonoro con diferentes colores en función del nivel.

Como sabemos, el ruido de tráfico es la fuente sonora más importante en las ciudades. La evaluación de los niveles sonoros producidos por el tráfico puede realizarse a través de dos formas distintas: **medición y predicción**.

- Los métodos de **medición** consisten en la realización de mediciones acústicas in situ con la instrumentación adecuada.
- Los métodos de **predicción** se basan en el conocimiento de las teorías de emisión y propagación del sonido, éstas permiten calcular los niveles sonoros mediante simulación de situaciones reales o predecibles mediante modelos matemáticos o físicos.

Generalmente se combinan los dos procedimientos. Los métodos de medición únicamente proporcionan información sobre una situación concreta espacio temporal. Los métodos de predicción pueden utilizarse para situaciones existentes y para otras que se puedan imaginar. Sus costes son menores y pueden simularse diferentes escenarios, con diferentes intensidades de tráfico, tipos de pavimentos, condiciones atmosféricas.... No obstante, los modelos de predicción deben contrastarse de forma continua con los niveles reales.



5.1. Técnicas de predicción

La predicción de los niveles de ruido se ha convertido en uno de los factores más importantes de la planificación urbana y el impacto ambiental.

La medición directa sobre los niveles de ruido proporciona información sobre una situación determinada por las condiciones concretas del momento en que se toman las medidas. Otro aspecto es el ahorro de horas de medición de los niveles de ruido, con vistas a analizar el ruido existente.

- Modelos predictivos teóricos.
 - o Se basan en la ecuación de propagación de las ondas. Dado su carácter general, es aplicable a cualquier circunstancia, pero, su complejidad, conocimiento profundo del cálculo integral y diferencial y lento proceso de cálculo, restringe este tipo de modelos a casos muy concretos y de poca aplicación en la ingeniería.
- Modelización a base de maquetas.
- Modelos predictivos experimentales, son los más utilizados en la actualidad.

5.2. Modelos predictivos experimentales para ruido de tráfico

En una autovía o en una autopista el tráfico está formado por un número de vehículos de diferentes tipos, clases, marcas y modelos, cuya distribución depende entre otros factores del tipo de vía y hora del día. Cuando se quieren calcular los niveles producidos por los vehículos, se suele asumir que hay dos tipos de vehículos: automóviles y camiones. Como ejemplo en la tabla siguiente se indican los niveles de presión sonora promedios medidos a 1,2 m del suelo a una distancia de 15 m para vehículos circulando por autopistas a dos velocidades diferentes:

Tipo de vehículo	Velocidad km/h	L _p , en dB, en cada una de las bandas de octava, Hz						L _{pA}
		125	250	500	1000	2000	4000	
Automóvil	56	65	61	62	61	57	53	65
	88	71	68	66	68	66	60	72
Camión	56	87	84,5	81,5	78	74,5	70,5	83,5
	88	87,5	85	87,5	82,5	77	73,5	87,5

Tabla 4.13. Niveles de presión sonora de promedios de vehículos a 15 m.

La mayoría de las fórmulas de predicción existentes constan de una expresión matemática central a la que posteriormente se le aplican diferentes correcciones debidas a composición del tráfico, velocidad del mismo, tipo de vía, tipo de capa de rodadura.

$$L_{Aeq,T} = L_{BASICO} + \sum_1^7 \Delta i$$

Para el cálculo del $L_{Aeq,T}$ mediante formulas o mediante tablas o gráficas, suelen basarse en una serie de variables:

A- Definición de la fuente de ruido.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

- B- Características topográficas del lugar.
- C- Caracterización de la fuente de ruido.
- D- Caracterización del sonido.

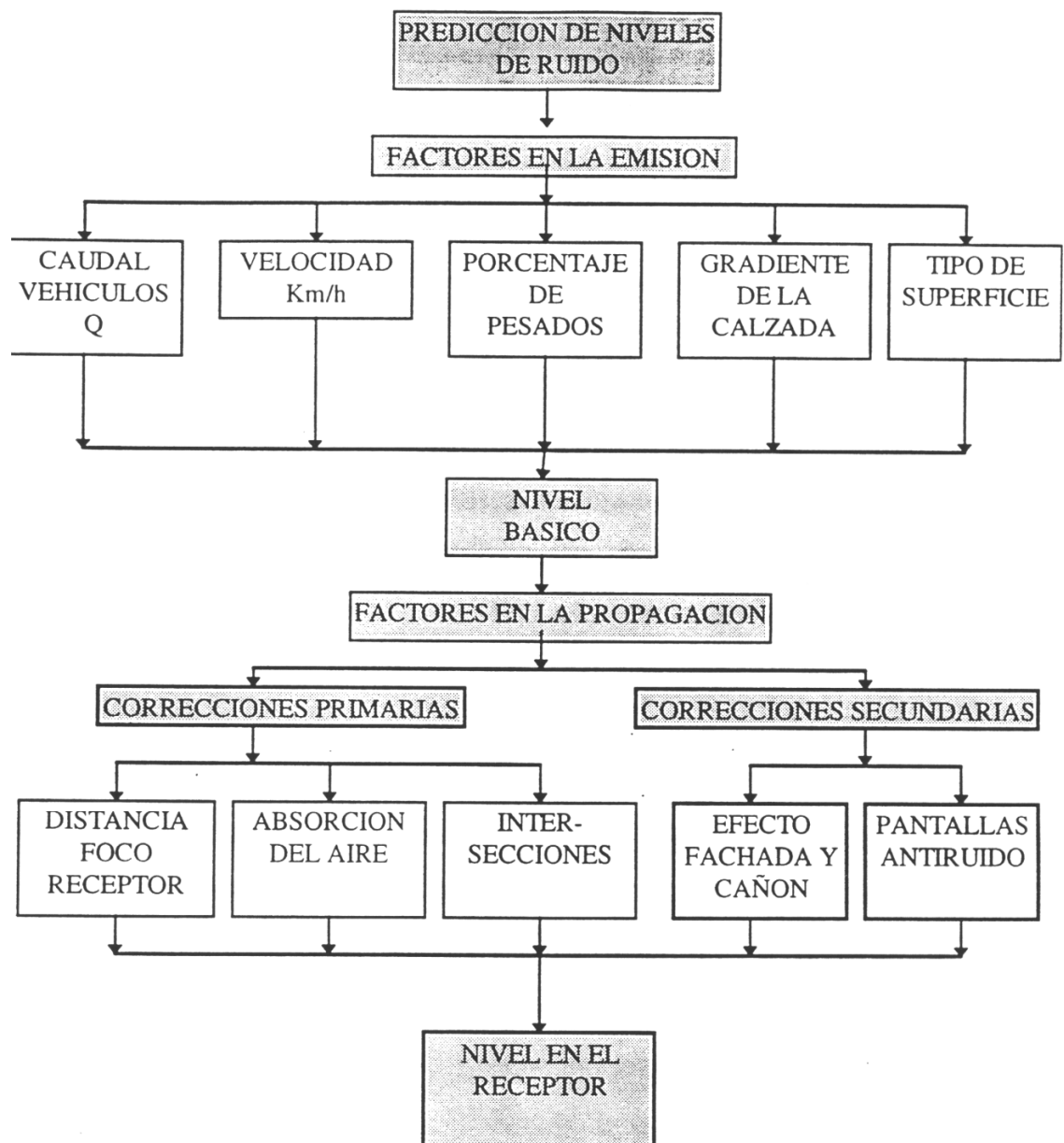


Figura 4.19. Diagrama de bloques a seguir para método de predicción acústica de ruido de tráfico.



En la Figura 4.19 se puede observar un diagrama de bloques con los pasos a seguir de forma general en los modelos de predicción para ruido de tráfico. En los apartados siguientes describiremos las diferentes etapas. Existen varias metodologías para el cálculo de los niveles generados por el tráfico. Para cada caso existe alguno que es más adecuado en función de:

- A quien vaya dirigido el trabajo.
- Que características y qué lugar es medido.
- Importancia del lugar.

Nosotros veremos un método aplicable a nivel general que va a hacer uso de gráficas en lugar de formulación (que se encuentran en los recursos del tema 4 en el campus virtual), aunque en la bibliografía existen otros.

5.2.1 Definición de la fuente de ruido

Es el primer paso, definir la/s fuentes de emisión (tráfico urbano, carreteras, ferrocarril, ...) perfiles longitudinales y transversales de su ubicación.

El nivel de emisión se refiere siempre al nivel de presión sonora una distancia de referencia que suele oscilar de unos estudios a otros entre los 8 y los 25 metros (en nuestro caso serán 15 metros), apareciendo el L_{BASICO} como el L_{Aeq} si la medición se hubiese realizado a la distancia de referencia.

En cuanto a la emisión (tráfico de vehículos en las ciudades o vías interurbanas) es debido a las variables como: caudal de vehículos, velocidad promedio, porcentaje de vehículos pesados, gradiente de la calzada y tipo de pavimento.

1. Estimación del tráfico medio horario

Es necesario tener datos del caudal de vehículos Q , para ello se puede consultar con el ayuntamiento o con el ministerio correspondiente, aunque es recomendable la medición del mismo.

Conociendo la Intensidad media diaria IMD (n° de vehículos/día) podemos obtener el caudal para los periodos de día y noche:

$$Q_{dia}(1h) = (0,9/15)IMD$$

$$Q_{noche}(1h) = (0,1/9)IMD$$

Obtenidas con la suposición de que el periodo día sufre el 90% del tráfico y se extiende a lo largo de 15 horas.

En la siguiente tabla se encuentra la definición del caudal para diferentes tipos de carretera:

TIPO DE CARRETERA	DIURNO (6-22)	NOCTURNO (22-6)
Autopista	0,06 IMD	0,014 IMD
Carreteras Federales	0,06 IMD	0,011 IMD
Carreteras Estatales	0,06 IMD	0,008 IMD
Vías Urbanas	0,06 IMD	0,011 IMD

Tabla 4.14. Niveles de presión sonora de promedios de vehículos a 15 m.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

2. Estimación del porcentaje de vehículos comerciales o pesados (camiones).

La influencia de los vehículos pesados (peso > 2T) es bastante importante.

3. Cálculo de las intensidades de tráfico de vehículos ligeros $Q_l(1h)$ y comerciales $Q_p(1h)$

Ejemplo:

$Q(1h) = 60$ vehículos.

15% pesados y 85% ligeros.

$Q_l(1h) = 60 \cdot 0,85$

$Q_p(1h) = 60 \cdot 0,15$

4. Estimación de las velocidades medias del tráfico.

Preguntar en entidades públicas relacionadas o acogerse a la máxima estipulada en esa vía.

La influencia de la velocidad en el nivel de presión sonora es nula en el caso de vías urbanas, y en vías interurbanas tiene su importancia.

5. Gradiente de la calzada.

$$\Delta L = K \cdot \delta$$

donde δ representa la pendiente de la calzada en tanto por ciento. El valor K varía de unos modelos a otros.

6. Tipo de pavimento.

Hoy en día se han diseñado asfaltos especiales de gran absorción acústica de tipo drenante, que reducen el nivel de ruido respecto a los comúnmente utilizados en 6dBA.

Finalmente, para obtener el L_{BASICO} nosotros utilizaremos las graficas 1 a 4 (en fichero separado que podéis encontrar en recursos del tema) que están basadas en :

$$L_{\text{BASICO}} = A + B \log Q$$

donde Q representa el número de vehículos por hora que pasan por una determinada calle o vía interurbana. Los valores de A y B suelen variar de unos estudios a otros, debido a las características de los vehículos que circulan en cada sitio y por las condiciones de circulación.

5.2.2 Características topográficas del lugar y de propagación del sonido

El segundo paso predictivo es la definición de las características topográficas del terreno sobre el cual se va a propagar el ruido, determinar la situación del receptor/es respecto del emisor/es, el perfil topográfico del espacio existente entre ellos y la presencia de obstáculos naturales o artificiales, caracterización acústica del terreno respecto a su naturaleza absorbente (suelo acústicamente duro o blando).

Las correcciones que hay que introducir puesto que los modelos experimentales están desarrolladas para distancias concretas y condiciones determinadas son:

Correcciones primarias:

Distancia de la fuente de ruido al emisor.

Absorción del terreno.



Ángulo de contribución de la vía.

Influencia de otras vías. (Intersecciones).

Correcciones secundarias:

Efecto fachada.

Efecto cañón.

Barreras o pantallas.

A. CORRECCIONES PRIMARIAS

1. Distancia de la línea de tráfico-receptor (d_1 , d_2).

Fuente lineal omnidireccional:

$$L_d = -10 \log d$$

Si asimilamos la fuente de ruido a una fuente puntual:

$$L_{d,h} = -20 \log d$$

Cuando la distancia de la fuente al receptor es pequeña (típico en medios urbanos), el problema es determinar la situación de la fuente lineal sonora en especial cuando existen varios carriles de propagación. Si la distancia al observador es más o menos la anchura de la calzada, el cálculo se separa en dos distancias y en dos niveles equivalente, uno para cada distancia y al final se suman. Este problema es llamado **carril equivalente de circulación**.

En vías urbanas e interurbanas de pocos carriles se suele tomar la distancia desde el centro de la calzada hasta el receptor. Calles de cuatro o menos carriles de circulación, podemos suponer el carril equivalente en la mediana de la calzada, puesto que el error que se comete es muy pequeño, mientras que en calles de más de cuatro carriles, el carril equivalente hay que situarlo a una cierta distancia de la mediana de la calzada, ya que el error que se comete en distancias pequeñas puede llegar a ser de 2 dBA.

Si la distancia es grande, sea cual sea el nº de carriles, puede suponerse el carril equivalente de circulación en la mediana de la calzada, sino se especifica su situación.

2. Absorción del terreno.

La influencia del tipo de suelo puede calcularse por medio de expresiones o fórmulas del tipo logarítmico o bien mediante gráficas.

En el método que utilizaremos nosotros se usará el gráfico 6 donde ya se incluye la absorción del aire. En él existe varias rectas en función de la distancia y la absorción del terreno (α). Esta absorción del terreno es dependiente del ángulo de la trayectoria según la altura del receptor (β). El ángulo de trayectoria se define como el ángulo que forma la línea de visión entre emisor y receptor y el plano del terreno.

$\beta > 15^\circ$ entonces $\alpha = 0$

$7^\circ < \beta < 15^\circ$ entonces $\alpha = 0,25$

$\beta < 7^\circ$ entonces $\alpha = 0,5$



3. Determinación del ángulo de contribución de la vía (ϕ).

Indica el ángulo de visión del receptor respecto a la vía del tráfico. En la figura siguiente se muestra un ejemplo que nos ayuda a comprender el concepto de ángulo de contribución. Como se observa entre el punto receptor R situado a 55 m del borde de la calzada y la calzada existe una pantalla acústica (dibujada como una línea gruesa). Ese obstáculo artificial provoca que el ruido creado por el tráfico sea recibido en diferentes cantidades según el tramo de contribución. En concreto tenemos tres zonas de contribución empezando por la izquierda un primer tramo sin barrera de 14° , seguido del tramo con barrera de 124° y finalmente otro tramo sin barrera de 42° .

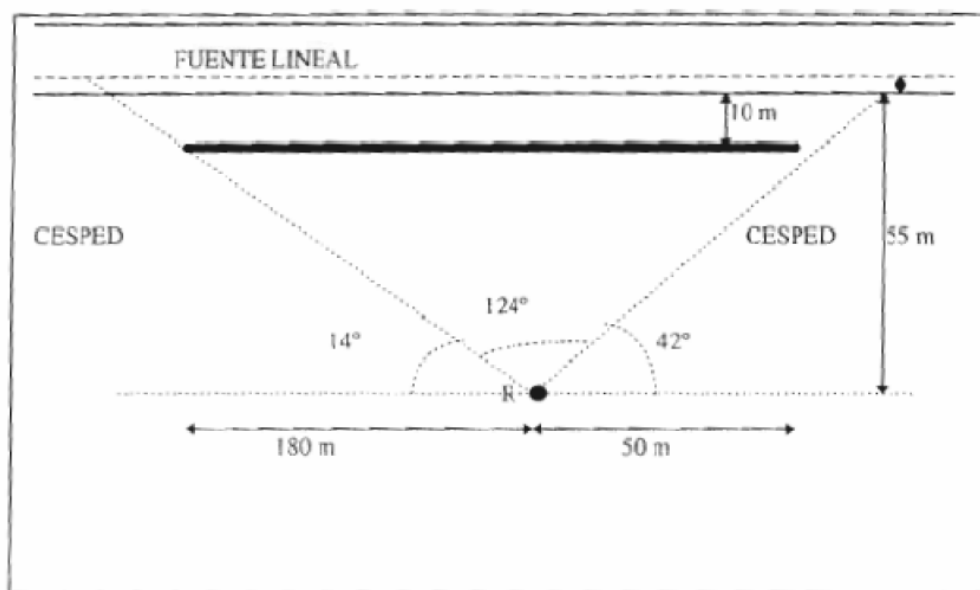


Tabla 4.15. Ángulos de contribución de la vía para un receptor detrás de una pantalla acústica.

4. Intersección de calles.

Se calcula la contribución individual de cada una de las calles con sus características correspondientes tanto de emisión como de propagación hasta el receptor, teniendo en cuenta en la propagación hasta el receptor el ángulo que se subtiende desde el receptor hasta la fuente de ruido que existe en cada calle, para sumar a continuación los efectos de cada calle de la forma:

$$L_{eq} = 10 \log \sum 10^{L_{i/10}} dBA$$

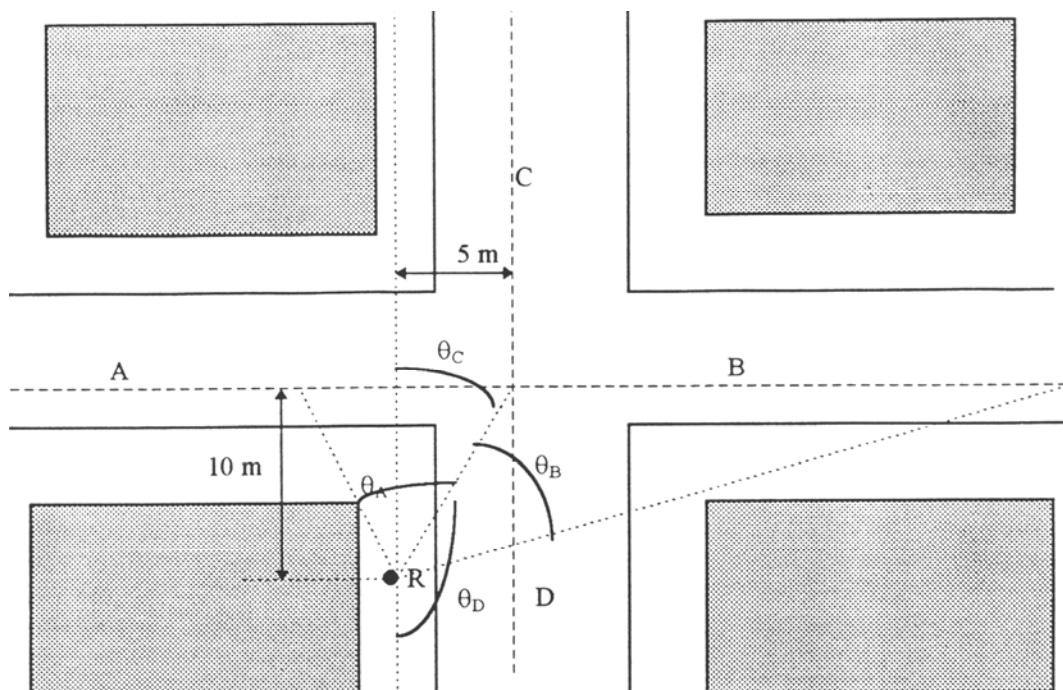


Tabla 4.16. Ejemplo de intersección de calles con diferentes ángulos de contribución.

B. CORRECCIONES SECUNDARIAS

5. Efecto fachada

Es típico de las calles en forma de L, se estima su corrección en $K1=+2,5$ dBA. Es debido a la reflexión del sonido en la fachada de las calles en forma de L.

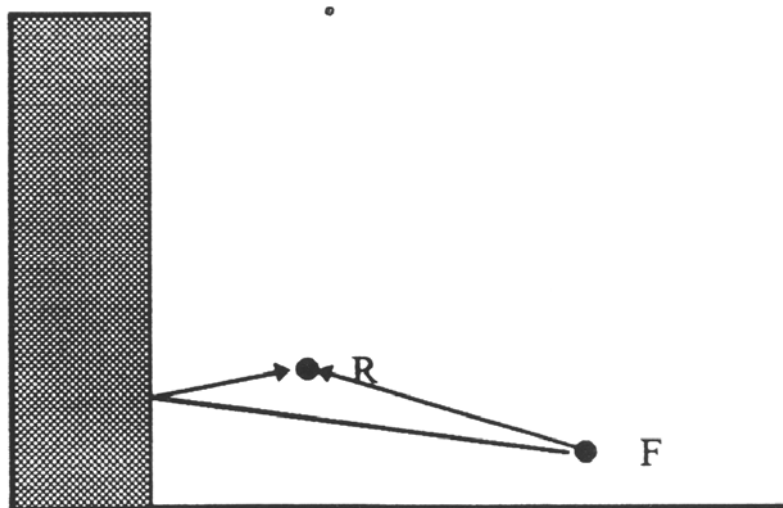


Tabla 4.17. Ejemplo de efecto fachada.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

6. Efecto cañón

Es típico de las calles en forma de U, y su corrección se estima en función de la relación J existente entre la altura de los edificios H y la anchura de la calle D .

$$J = \frac{H}{D}$$

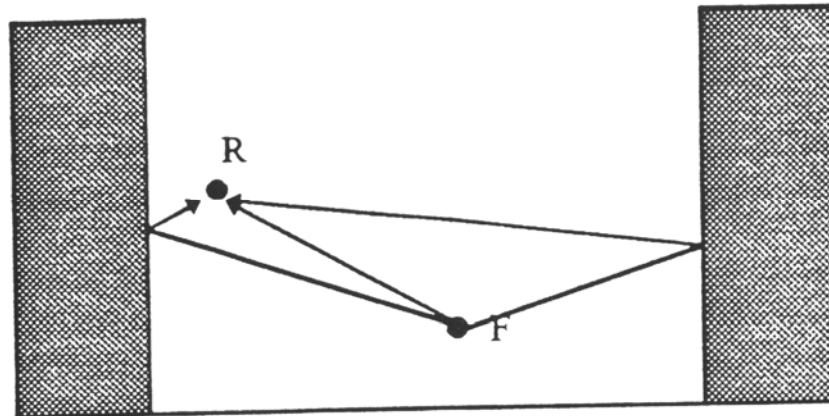


Tabla 4.18. Ejemplo de efecto cañón.

Para calcular la corrección por el coeficiente de altura de edificios en calles usaremos el gráfico 9, obteniendo un valor que contribuye positivamente al nivel recibido.

7. Barreras o pantallas

Tal y como hemos comentado en el apartado 3.3 los obstáculos artificiales producen una atenuación en la propagación del sonido. Usaremos el gráfico 8 para calcular la atenuación sonora del tráfico por una barrera mediante el número de fresnel.

5.2.1 Resumen pasos a seguir para la predicción de nivel

1. En primer lugar se obtendrá el nivel equivalente para día y para noche a una distancia de referencia (15 m) tanto para vehículos ligeros como pesados usando las gráficas de 1 a 4.
2. Obtendremos un solo nivel para cada periodo (día o noche) sumando los niveles de vehículos ligeros y pesado usando la formula básica de suma de niveles o el gráfico 5.
3. Realizar correcciones por distancia usando gráfico 6.
4. Calcular corrección por ángulo de contribución de la vía usando el gráfico 7.
5. Para entornos interurbanos tendremos en cuenta el encuentro entre calles.
6. Realizar correcciones por reflexiones en las edificaciones usando gráfico 9.
7. Realizar correcciones por barreras usando gráfico 8.

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA (T5)

INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA SUBMARINA

Fundamentos de Acústica

Edición 2011-2012

Profesor: Juan M. Navarro

UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN ANTONIO DE MURCIA



Contenido

1. INTRODUCCIÓN	3
2. VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AGUA DEL MAR	4
3. LAS ONDAS SONORAS EN LA SUPERFICIE DEL AGUA	5
4. LAS ONDAS ACÚSTICAS BAJO LA SUPERFICIE DEL AGUA	8
4.1. Perdidas por transmisión sonoras	8
4.2. Fenómenos de refracción y reflexión.....	11
4.3. Canales sonoros	16
5. ENMASCARAMIENTO POR RUIDO Y REVERBERACIÓN.....	20



1. INTRODUCCIÓN

En este tema vamos a estudiar la transmisión de las ondas acústicas a través del agua, teniendo en cuenta las pérdidas por transmisión, la generación y recepción de los sonidos, así como los fenómenos de reflexión, refracción, divergencia, absorción, ruidos y reverberación que presentan las ondas al propagarse a través de este medio.

Como procedimientos de comunicación bajo el agua existen cuatro métodos generales: 1º) óptico; 2º) magnético; 3º) eléctrico y 4º) acústico. Veamos seguidamente cómo se comportan cada uno de estos métodos en este medio. Se sabe que el agua es muy opaca a la luz infrarroja y ultravioleta, no siendo particularmente transparente para la luz visible. La transmisión y detección magnética puede utilizarse para distancias relativamente cortas, las ondas de radio o electromagnéticas se atenúan rápidamente al propagarse a través del agua salada por ser buena conductora. La transmisión de información bajo el agua por medio de las ondas acústicas, es mucho mejor que los otros métodos mencionados anteriormente, debido a que el agua es un buen medio para la transmisión de estas ondas. Por lo tanto, excepto para ciertas aplicaciones específicas, éste método es el utilizado generalmente para la transmisión de señales en el agua.

La transmisión del sonido en el mar no se puede explicar con sencillez, debido a que existen muchos factores que influyen en este medio. Algunos de estos factores son:

1. El mar no es un medio ilimitado, por lo que tanto la superficie como el fondo afectan a la transmisión. La superficie del mar produce una reflexión de las ondas casi perfecta, debido al cambio de impedancia acústica del agua al aire, que es aproximadamente de 3.000. Si el mar fuera perfectamente plano, la reflexión de la superficie podría estudiarse mediante una imagen opuesta al otro lado de la superficie límite, sin embargo el mar nunca está en reposo con lo que la presencia de las olas dificultan la condición de superficie plana. En aguas poco profundas el fondo del mar introduce otra condición de límite molesto, puesto que no se conoce la forma de dicho fondo.
2. El mar no es un medio homogéneo, hay variaciones verticales en el mismo, que son quizás más pronunciadas y producen refracción de las ondas, reduciendo por lo tanto la eficacia en la transmisión de la señal. En el caso de una refracción muy pronunciada, la distancia de operación puede reducirse muy seriamente. Estos fenómenos se deben a las variaciones de temperatura y densidad que experimenta el agua del mar.
3. El mar no es medio isótropo, debiéndose esto a las variaciones de densidad y de presión que presenta el agua del mar. Además de todo lo expuesto anteriormente, deben de tenerse en cuenta, como problemas de transmisión, el ruido producido por los organismos marinos, el generado por barcos, el de la superficie caracterizado por el oleaje, el de la lluvia, el debido a las corrientes y cambios de presión hidrostática, etc. La acústica submarina tiene un gran número de aplicaciones, tanto en la investigación como en la industria, siendo especialmente útil en oceanografía, marina mercante y de guerra, comunicación, etc.



2. VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AGUA DEL MAR

Se ha visto que la velocidad del sonido en agua pura depende de la temperatura, pero deben tenerse en cuenta la influencia en la velocidad del sonido dos factores adicionales, que son la **salinidad** y los **cambios de presión asociados a los cambios en la profundidad**. Cada uno de estos factores tiende a aumentar la velocidad, estando dado su valor por la ecuación empírica:

$$c = 1449 + 4,66t - 0,055 t^2 + 0,0003t^3 + (1,3 - 0,012t)(s - 35) + 0,017d$$

Simplificada en:

$$c = 1449 + 4,66t - 0,055 t^2 + 1,3(s - 35) + 0,017d \quad 5.1$$

donde c velocidad del sonido en m/s, t temperatura del agua en °C, s salinidad expresada en tantos por mil, d profundidad con relación a la superficie del mar en m.

La velocidad del sonido en la superficie del mar, considerando un 35 por 1.000 de salinidad es de 1.449 m/s a 0°C. Se considera generalmente una velocidad standard para estudiar los fenómenos de transmisión que es de 1.450 m/s. Al mismo tiempo que se adopta una velocidad standard, se elije una impedancia característica standard de valor:

$$\rho c = 1,54 \cdot 10^6 \text{ ohmios acústicos}$$

Ejercicio

Encontrar una relación entre la velocidad de una partícula en el aire y en el agua, cuando en los dos medios la presión acústica es la misma, y cuando lo es la intensidad acústica.

Solución: Recordemos que la expresión de la impedancia característica es: $Z = p/v = \rho c$, por lo tanto para el primer caso:

$$v_{\text{air}} = \frac{P}{(\rho c)_{\text{air}}} \quad v_{\text{agua}} = \frac{P}{(\rho c)_{\text{agua}}}$$

luego,

$$\frac{v_{\text{air}}}{v_{\text{agua}}} = \frac{(\rho c)_{\text{agua}}}{(\rho c)_{\text{air}}} = \frac{1,54 \cdot 10^6}{413} = 3710,8$$

Cuando la intensidad acústica es la misma, tenemos que de acuerdo con el valor eficaz de la presión será:

$$I_{\text{air}} = \frac{P_{\text{rms}}^2}{(\rho c)_{\text{air}}} \quad I_{\text{agua}} = \frac{P_{\text{rms}}^2}{(\rho c)_{\text{agua}}}$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

$$p_{\text{ref}}^2 = 1_{\text{ref}}(\rho \cdot c)_{\text{ref}} \quad p_{\text{ref}}^2 = 1_{\text{ref}}(\rho c)_{\text{ref}}$$

luego,

$$\frac{v_{\text{ref}}}{v_{\text{ref}}} = \sqrt{\frac{(\rho c)_{\text{ref}}}{(\rho c)_{\text{ref}}}} = 60,9$$

3. LAS ONDAS SONORAS EN LA SUPERFICIE DEL AGUA

El estudio de la propagación del ruido, y en especial cuando ésta tiene lugar en áreas urbanas, es un proceso bastante complejo que depende de varios factores. Así, para conocer en cualquier punto el nivel sonoro producido por una fuente acústica situada a una cierta distancia de dicho punto, es necesario tener en cuenta, entre otros, los siguientes factores:

Cuando se agita un punto de una superficie inmóvil de agua, se producen ondas superficiales si la superficie es isótropa, siendo evidente que la perturbación se va a propagar con la misma velocidad en todas direcciones a partir del punto fuente, y que en todo instante ocupa los puntos de una circunferencia centrada en la fuente, luego la onda es circular. La propagación de las ondas en el agua hace intervenir varios fenómenos, la producción de una protuberancia en la superficie plana y horizontal crea en la masa de líquido un aumento de presión, que depende de la altura de la protuberancia en la vertical considerada. Además, al aumentar la superficie libre las fuerzas de tensión superficial entran en juego, siempre que el radio de curvatura de la superficie sea lo suficientemente grande, es decir en tanto que la longitud de onda sea también, este segundo efecto es despreciable frente al primero. Al estudiar la propagación de las ondas en la superficie del agua, se observa que las partículas recorren unas trayectorias cerradas que se pueden considerar aproximadamente circulares (figura 5.1).

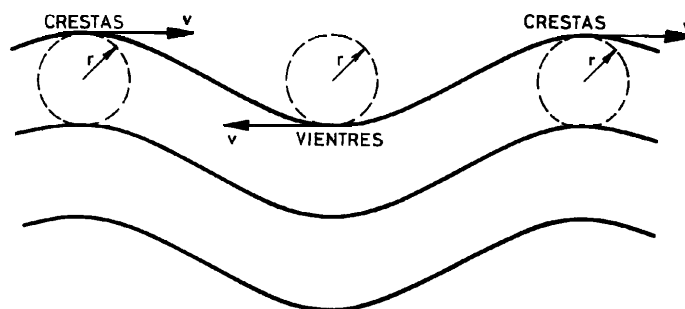


Figura 5.1 Propagación de ondas en la superficie del agua.



Debido al movimiento, la velocidad de las partículas no es la misma en las crestas que en los valles, siendo en las primeras menor y en las segundas mayor que cuando la superficie está inmóvil. Una experiencia realizada introduciendo en el agua arenilla, muestra que las partículas describen circunferencias de radio r centradas en su posición en el agua en reposo, con una velocidad uniforme:

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

donde T es el período del movimiento.

La velocidad de las ondas en las crestas y los valles valdrá:

$$v_1 = c - v$$

$$v_2 = c + v \quad 5.2$$

donde c es el valor de la velocidad de las ondas en el agua. Si ahora aplicamos el teorema de Bernoulli, puesto que la presión en las crestas y los vientres es la misma, siendo la diferencia de altura $2r$, tendremos:

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g 2r = P_0 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad 5.3$$

de donde:

$$v_2^2 - v_1^2 = 4gr \quad 5.4$$

por lo que a partir de (5.2) y (5.4) nos queda:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \quad 5.5$$

que nos dice que la velocidad de las ondas en la superficie del agua es independiente de la altura de las crestas, pudiendo ponerse la expresión (5.5) en función de la longitud de onda, multiplicando ambas partes por la velocidad del sonido, y nos queda:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = 1.25\sqrt{\lambda} \quad 5.6$$

Observamos que la velocidad es función de la longitud de onda, o sea las ondas de mayor longitud de onda avanzan más rápidamente que las ondas de menor valor. La expresión (5.6) muestra que la velocidad depende de la frecuencia, y como el medio es dispersivo conviene en este caso conocer la velocidad con que avanza el grupo de ondas, por lo que de acuerdo con la expresión de la velocidad de grupo, tenemos:

$$c_g = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} - \lambda \sqrt{\frac{g}{2\pi}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{\lambda}} = \frac{c}{2}$$

o sea la velocidad de grupo es igual a la mitad de la velocidad de onda, las crestas de las ondas avanzan a través del grupo con una velocidad doble de la velocidad de grupo, esto se observa infinitas veces al contemplar la llegada de las olas a las playas. Se puede ver la diferencia entre las velocidades c_g y c , observando atentamente la propagación de un grupo de ondas producido en la



superficie del agua contenida en un recipiente mucho más largo que ancho, mediante un choque vertical dado a una de sus extremidades por medio de una chapa paralela al lado pequeño. El grupo no se desplaza tan deprisa como las ondas que lo forman, se observa por consiguiente como estas se acercan al frente de onda y se desvanecen a medida que lo alcanzan.

Todo lo anterior deja de ser válido en aguas poco profundas, o sea cuando el nivel de la superficie del agua está separado del fondo por distancias que son pequeñas frente a la longitud de onda de las ondas, ya que a estas pequeñas profundidades las trayectorias recorridas dejan de ser circulares y son elípticas. Si la profundidad es muy pequeña o bien la longitud de onda muy grande, las elipses son muy achatadas y las partículas se limitan a moverse en su plano, hacia adelante y hacia atrás. Se obtiene que la velocidad de propagación de las ondas, que se originan como consecuencia de una sucesión de elevaciones y depresiones está dada por:

$$c = \sqrt{g h} \quad 5.7$$

que es independiente de la forma de la ondas, siendo h el nivel de elevación con el agua en movimiento. Por lo tanto, una expresión general de la velocidad de propagación de las ondas, será:

$$c = \sqrt{\frac{g \lambda}{2\pi} f\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad 5.8$$

donde la función $f(2\pi h/\lambda)$ tiende a la unidad cuando h crece indefinidamente y se confunde con la variable $2\pi h/\lambda$ cuando h tiende a cero, o sea para aguas muy profundas y para aguas poco profundas frente a la longitud de onda de las ondas, o sea para grandes profundidades hay dispersión, mientras que para pequeñas profundidades no la hay.

Para ondas de pequeña longitud, además de todo lo anterior, se tendrá en cuenta el efecto debido a la tensión superficial, con lo que habrá que añadir un nuevo término a la expresión (16.8), que quedará de la siguiente forma:

$$c = \sqrt{\frac{g \lambda}{2\pi} f\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) + \frac{2\pi \sigma}{\lambda \rho}} \quad 5.9$$

donde σ es la tensión superficial y ρ la densidad del agua.



4. LAS ONDAS ACÚSTICAS BAJO LA SUPERFICIE DEL AGUA

Las ondas acústicas en el agua se producen, transmiten y detectan dentro de una gama muy amplia de frecuencias, que van aproximadamente de unos 2 Hz a unos 50 MHz. Se pueden considerar como ondas ultrasónicas de alta energía aquellas para las que no existe una relación lineal entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante. El flujo de energía de una onda esférica, en ausencia de disipación, decrece inversamente con el cuadrado de la distancia a la fuente, como ya vimos en el tema de las ondas esféricas. Ahora la atenuación bajo las actuales condiciones es mayor que la estudiada en los temas anteriores.

En el agua salada la atenuación es idéntica en altas frecuencias a la del agua pura, en cambio a bajas frecuencias la atenuación es mayor, esto se debe a la salinidad del agua, y es posible que esta mayor absorción se deba también a la interacción molecular, de forma análoga al fenómeno de absorción intermolecular en el aire. La atenuación del sonido en agua es muy difícil de medir a bajas frecuencias. El valor de la atenuación anómala depende de las condiciones del agua, como por ejemplo, las burbujas de aire de ciertos tamaños y concentraciones, que producen enormes atenuaciones. En el caso de transmisión a grandes distancias la atenuación adicional se debe a la inhomogeneidad del agua.

Se ha indicado que la onda es de naturaleza esférica, pero en aguas poco profundas la onda se puede confinar entre la superficie y el fondo en cuyo caso la propagación es parecida a la de una onda cilíndrica. Bajo estas condiciones en ausencia de disipación la energía disminuye generalmente con la distancia, pudiendo alcanzarse en aguas poco profundas a bajas frecuencias transmisión a grandes distancias. En este tipo de propagación influye la forma del fondo, si es de arena, fango, roca, etc.

En aguas profundas (superiores a 1.200 m), se puede despreciar tanto el efecto del fondo como el de la superficie, puesto que la variación vertical de la temperatura, y por tanto la velocidad de las ondas, no depende de la profundidad para estos límites.

La velocidad del sonido en el mar cumple las siguientes reglas, como ya hemos visto:

1. La velocidad aumenta con la temperatura aproximadamente un 0,2% para cada grado centígrado.
2. La velocidad aumenta muy despacio con la salinidad, el aumento total es del 31 al 37% siendo solamente 0,7 o 0,1% por cada 0,1% de aumento de la salinidad.
3. La velocidad para una profundidad dada, aumenta con la misma.

Estudiemos con más detenimiento seguidamente todos estos fenómenos.

4.1. Pérdidas por transmisión sonoras

Si el agua del mar se considerase como un medio homogéneo, solo los fenómenos de divergencia y absorción contribuirían al decrecimiento del nivel de presión de un sonido que se propaga a partir de una fuente. Por ejemplo, una onda esférica divergente que se propaga a través de este medio, puede venir representada por la ecuación:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right) e^{-\alpha r_2} \quad 5.10$$



donde: p_1 y p_2 son respectivamente las presiones acústicas a las distancias r_1 y r_2 desde el centro aparente del origen de la onda; y α coeficiente de absorción del medio en nepers/metro.

Si tomamos $20 \lg$ a ambos lados de la ecuación (5.10) nos queda:

$$20 \lg p_2 = 20 \lg p_1 + 20 \lg \left(\frac{r_1}{r_2} \right) - 8,7 \alpha (r_2 - r_1) \quad 5.11$$

y llamando $a = 8,7 \alpha$ constante de absorción en dB/m, tenemos:

$$20 \lg p_1 - 20 \lg p_2 = 20 \lg \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + a (r_2 - r_1)$$

o bien

$$L_{r_1} - L_{r_2} = H$$

La parte de la izquierda de esta igualdad representa el decrecimiento del nivel de presión cuando la onda se propaga desde r_1 hasta r_2 y se puede reemplazar por H que representa la pérdida por transmisión en dB, luego:

$$H = 20 \lg \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + a (r_2 - r_1) \quad 5.12$$

Generalmente las pérdidas por transmisión se dan a una distancia r con relación al nivel de presión que existe a la distancia de 1 m desde el centro efectivo de la fuente sonora, por lo que usando esta distancia de referencia la expresión (5.12) puede ponerse de la forma:

$$H = 20 \lg r + ar \quad 5.14$$

La figura 5.2 es la representación gráfica de la ecuación (5.13), donde el valor de las pérdidas por transmisión es función de la distancia r para tres frecuencias diferentes. En la curva se puede observar que para bajas frecuencias, como por ejemplo 1 kHz la pérdida de transmisión se debe a la divergencia esférica del rayo. Sin embargo, a medida que la frecuencia aumenta, las otras curvas muestran que las pérdidas de absorción llegan a ser muy grandes.

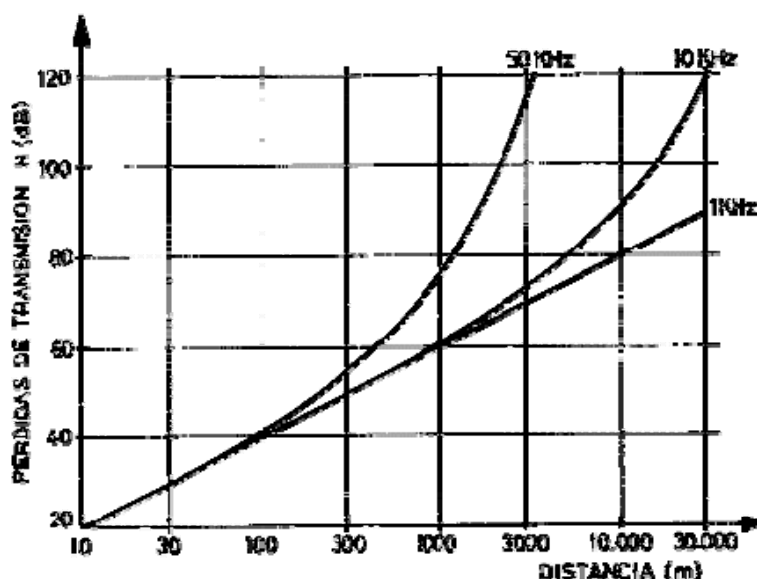


Figura 5.2. Dependencia de las pérdidas de transmisión con la distancia y la frecuencia.

Si diferenciamos la expresión (5.13) con relación a r nos queda:

$$\frac{dH}{dr} = \frac{20}{2,3} \frac{d}{dr} (\ln r) + a = \frac{8,7}{r} + a \quad 5.14$$

que nos da la pérdida por transmisión espacial en dB/m. Ahora definimos el alcance de cruce r_c como aquella distancia para la que el tanto ciento de la pérdida por transmisión debida a la divergencia es igual al tanto por ciento de la pérdida por transmisión debida a la absorción:

$$r_c = \frac{8,7}{a} \quad 5.15$$

para 10 kHz el alcance de cruce es de 8.700 m, mientras que para 50 kHz se reduce a 600 m. A partir de la discusión precedente, se ve que para transmitir energía acústica a través del agua del mar a grandes distancias con una pérdida por transmisión mínima, deben usarse bajas frecuencias.

Cuando las pérdidas por transmisión se miden en el océano, se observa frecuentemente un valor que varía sensiblemente del dado por la ecuación (5.13), generalmente mayor. Los factores que contribuyen a este aumento son una divergencia adicional debida a la refracción, interferencias constructivas y destructivas asociadas con múltiples tipos de propagación, incluyendo reflexiones en la superficie y el fondo del mar, difracción y scattering causados por la presencia de inhomogeneidades en el agua. Resulta imposible el encontrar expresiones y valores precisos para calcular la pérdida por transmisión asociada con cada uno de estos factores adicionales para ciertas situaciones ideales. Todas estas pérdidas adicionales se representan mediante el término A que se llama anomalías de transmisión dado en dB, por consiguiente la pérdida total por transmisión en dB está dada por:

$$H = 20 \lg r + a r + A \quad 5.16$$



4.2. Fenómenos de refracción y reflexión

El fenómeno más importante que interfiere con la divergencia esférica y la propagación del sonido en el agua del mar, es el de la refracción debida a las variaciones de velocidad. Como se ve a partir de la expresión (5.1) los principales factores que influyen en la velocidad del sonido en el agua del mar son la temperatura, salinidad y su profundidad. De estos tres factores el que origina mayores variaciones de la velocidad son las variaciones de temperatura. Podemos decir que existen tres zonas donde la temperatura del mar varía de una forma diferente y esto produce por lo tanto, una variación diferente de la velocidad de propagación de las ondas. La primera zona va de unos 100 a 400 m presentando una variación continua de la temperatura, denominándose zona de termoclina, la tercera zona se presenta de los 1.200 m en adelante, donde la temperatura permanece prácticamente constante, aunque disminuye de una forma muy lenta con la profundidad y se llama zona fría.

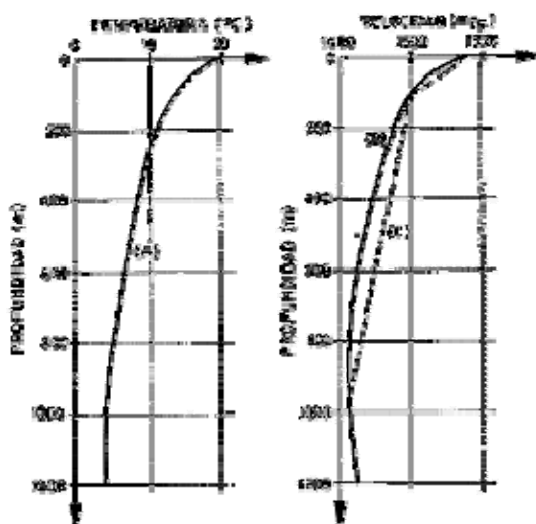


Figura 5.3. Curva A termoclina típica, curva B velocidad del sonido variación con la profundidad y curva C velocidad simplificada del sonido variación con la profundidad.

Esto da lugar a una variación de la velocidad con la profundidad según se muestra en la figura 5.3. Esta variación de temperatura y por lo tanto de velocidad origina fenómenos de refracción de las ondas, y esta desviación hace que las mismas no alcancen determinadas zonas, formando zonas de sombra. En los primeros 100 m de profundidad es común que aparezcan diferencias de más de 5°C, lo que produce un cambio en la velocidad de aproximadamente un 0,2% para una temperatura próxima a los 15°C.

La trayectoria de una onda sonora a través de un medio en el que la velocidad varía con la profundidad se puede calcular mediante la aplicación de la ley de Snell. Esta ley se puede poner de tal forma que:

$$\frac{\cos \theta}{\cos \theta_0} = \frac{c}{c_0} \quad 5.17$$



donde θ es el ángulo que forma el rayo con la horizontal a una profundidad donde la velocidad del sonido es c , y c_0 es la velocidad a una profundidad donde el rayo forma un ángulo θ_0 . Vamos a demostrar que la trayectoria de una onda a través del agua que tiene un gradiente de velocidad constante y positivo de g m/s, es un arco de circunferencia. Consideremos un círculo de radio R según se ve en la figura 5.4.

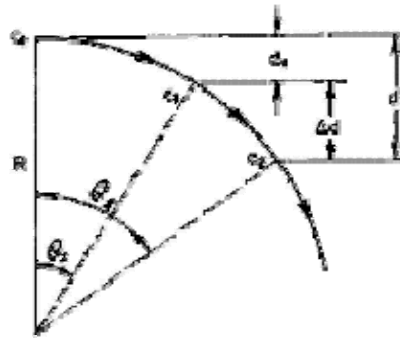


Figura 5.4. Diagrama para encontrar la relación entre un gradiente de velocidad g y el radio de curvatura R de un rayo acústico.

A partir de esta figura, tenemos:

$$d_1 = (1 - \cos \theta_1) R$$

$$d_2 = (1 - \cos \theta_2) R$$

por lo tanto:

$$\Delta d = d_2 - d_1 = R (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad 5.18$$

Como el agua tiene un gradiente de velocidad constante y positivo, la velocidad del sonido disminuye con la profundidad:

$$c = c_0 - g \Delta d$$

$$g = - \frac{c_0 - c_1}{\Delta d} \quad 5.19$$

A partir de las expresiones (5.17) y (5.19) nos queda:

$$\Delta d = - \frac{c_0 - c_1}{g}$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

y

$$\frac{\cos \theta_1 - \cos \theta_2}{\cos \theta_1} = \frac{c_1 - c_2}{c_1}$$

por tanto:

$$\Delta d = \frac{c_1}{g \cos \theta_1} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

comparándola con la ecuación (5.18) vemos que la trayectoria es circular de radio:

$$R = \frac{c_1}{g \cos \theta_1} \quad 5.20$$

De forma análoga a la ecuación (5.18), podemos escribir:

$$\Delta x = R (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \quad 5.21$$

donde Δx es la distancia horizontal recorrida por el haz para llegar a la profundidad Δd , por lo que:

$$\Delta x = \Delta d \cotg \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \quad 5.22$$

Veamos seguidamente como la refracción de los rayos sonoros que viajan a través de un sistema que tiene un gradiente de temperatura como el de la figura 5.5, puede producir transmisiones anómalas. En este caso podemos ver que existe una región isoterma hasta una profundidad de 30 m y como a medida que aumenta la profundidad esta temperatura disminuye a razón de 0,07 °C por m. Podemos ver como a unos 15 m de la superficie varios rayos originan una fuente. En un punto A la señal recibida será aproximadamente la calculada para ondas esféricas divergentes, y por lo tanto la transmisión anómala será despreciable. Por debajo de la zona A, está la zona B llamada zona de sombra, en la que la presión sonora teóricamente es cero. Sin embargo, actualmente las presiones medidas en la zona de sombra no son estrictamente cero, debido a factores tales como irregularidades en el gradiente de temperatura, fenómenos de difusión, scattering de la superficie del agua cuando esta agitada por acción de las ondas, etc. Sin embargo, su nivel puede estar 30 dB por debajo del valor de la divergencia esférica simple, con un valor correspondiente para la transmisión anómala. Por debajo de la zona de sombra, hay una tercera región C donde la presión sonora medida tiene un valor intermedio comprendido entre los de las regiones A y B. El decrecimiento de la presión en esta región es debido a la refracción que aparece a bajas frecuencias, lo que hace que los rayos se propaguen más rápidamente que para una onda esférica simple.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

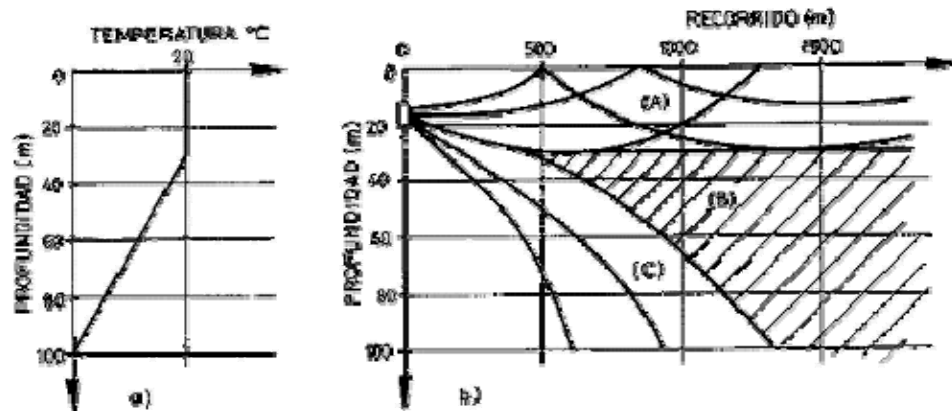


Figura 5.5. a) Termoclimate, b) Recorridos de rayos acústicos típicos.

La anomalía de transmisión producida al aumentar la divergencia con la profundidad de la capa (figura 5.6), si recordamos la expresión que nos da la amplitud de presión de la onda transmitida en función de la amplitud de presión de la onda incidente:

$$p_{02} = p_{01} \frac{2\rho_2 c_2 \cos\theta_i}{\rho_2 c_2 \cos\theta_i + \rho_1 c_1 \cos\theta_r}$$

si sustituimos $\cos\theta_i = \sin\theta_1$ y $\cos\theta_r = \sin\theta_2$ y suponemos $\rho_1 c_1 \approx \rho_2 c_2$ vemos que la expresión anterior podemos ponerla de la forma:

$$p_{02} = p_{01} \left[\frac{2 \sin\theta_1}{\sin\theta_1 + \sin\theta_2} \right]$$

y la transmisión anómala será:

$$A = 20 \lg \left(\frac{p_{01}}{p_{02}} \right) = 20 \lg \left[\frac{\sin\theta_1 + \sin\theta_2}{2 \sin\theta_1} \right] \quad 5.23$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Ejercicio:

Supongamos que la velocidad del sonido en el agua del mar disminuye uniformemente desde un valor de 1.500 m / s en la superficie hasta 1.450 m/s a una profundidad de 100 m. Calcular

- 1) el gradiente de velocidad,
- 2) la distancia horizontal para un rayo al llegar a dicha profundidad de 100 m
- 3) el ángulo que forma el rayo al llegar a dicha profundidad.

Solución: de acuerdo con las expresiones anteriores el valor del gradiente de velocidad será:

$$g = -\frac{c_2 - c_1}{d} = \frac{1.450 - 1.500}{100} = +0,5 \text{ m/s por m.}$$

El haz sonoro a una profundidad d es tangente a la circunferencia en el punto B (figura 5.6) y forma un ángulo θ_1 con la horizontal. De esta forma se deduce:

$$x^2 + (R - d)^2 = R^2$$

o bien:

$$x^2 = 2dR - d^2$$

si reemplazamos:

$$R = \frac{c_1}{g}$$

tenemos:

$$x^2 = \frac{2dc_1}{g} - d^2$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

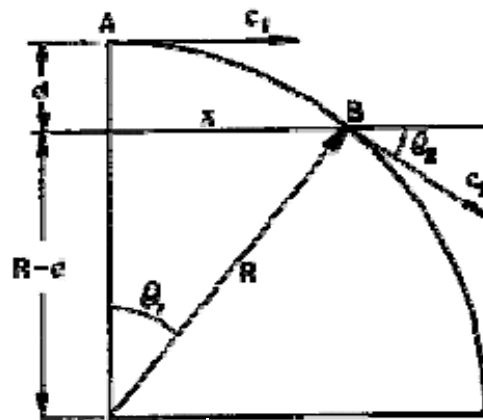


Figura 5.6. Esquema para el ejercicio

Generalmente la distancia recorrida horizontalmente por el haz sonoro es mucho mayor que la profundidad que alcanza $x \gg d$, por tanto podemos simplificar:

$$x = \sqrt{\frac{2c_1 d}{R}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.500 \cdot 100}{0,5}} = 775 \text{ m.}$$

Por último como $\theta_1 = 0$ el ángulo θ_2 será:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{c_2}{c_1}\right) = \arcsin\left(\frac{1.450}{1.500}\right) = 10^\circ$$

4.3. Canales sonoros

Un tipo de refracción que presenta un interés particular es el que existe a grandes profundidades, donde la temperatura es aproximadamente constante, con un valor de alrededor 4°C , a estas profundidades las condiciones son muy estables y uniformes todo el año. En este caso la velocidad del sonido alcanza un mínimo, aumentando para menores profundidades debido al incremento en la temperatura y para grandes profundidades debido al incremento de la presión. Como consecuencia de estas condiciones, todos los rayos que se originan en esta región de velocidad mínima forman un pequeño ángulo con la horizontal tendiendo la curva a volver hacia este nivel sin alcanzar otra superficie o el fondo, formando lo que se conoce con el nombre de canal sonoro.

Las ondas que se propagan a través de estos canales se ven obligadas a permanecer en los mismos, y por lo tanto las ondas no presentan el fenómeno de divergencia tan rápido como cuando la velocidad no varía. La divergencia inicial es esférica a una distancia donde el canal se dice que está lleno, siendo la divergencia aproximadamente cilíndrica. En estas condiciones las pérdidas de transmisión asociadas con la divergencia están dadas por la ecuación:



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

$$H = 20 \lg \left(\frac{r}{1} \right) + 10 \lg \left(\frac{r}{n} \right) = 10 \lg r_1 + 10 \lg r \quad 5.24$$

cuyo valor es menor que $20 \lg r$ para la divergencia esférica a una distancia r . Por tanto, la absorción de las frecuencias de audio en el agua del mar es demasiado pequeña, y las componentes de bajas frecuencias de señales sonoras en este canal se propagan a grandes distancias, pudiendo alcanzar valores superiores a los 1.000 km en el caso de las explosiones.

Para analizar este tipo de transmisión, suponemos que la velocidad aumenta uniformemente a razón de g' m/s por metro por encima del eje del canal sonoro, c_m es la velocidad mínima en el eje del canal sonoro, y asimismo aumenta a razón de g'' m/s por metro por debajo del eje. Cuando el gradiente de velocidad g' es constante, los rayos atraviesan el eje del canal sonoro hacia arriba formando un ángulo θ , con la horizontal por lo que viajarán formando un arco de círculo de radio R' , y cruzarán de nuevo el eje del canal sonoro a una distancia horizontal:

$$\Delta x' = 2R' \sin \theta_1 = \frac{2c_m}{g' \cos \theta_1} \sin \theta_1 = \frac{2c_m}{g'} \tan \theta_1 \quad 5.25$$

Por tanto, el rayo atraviesa el eje del canal sonoro en dirección hacia abajo formando un ángulo θ_2 y cruzará de nuevo a una distancia horizontal:

$$\Delta x'' = 2R'' \sin \theta_2 = \frac{2c_m}{g''} \tan \theta_2 \quad 5.26$$

Generalmente los rayos que atraviesan el eje del canal sonoro formando un ángulo θ_0 , lo volverán a cruzar de nuevo formando este mismo ángulo, primero en una dirección y luego en la contraria.

Vamos a tratar de obtener una expresión de la velocidad media horizontal de los rayos que cruzan el eje de un canal sonoro con un ángulo θ_0 (figura 5.7).

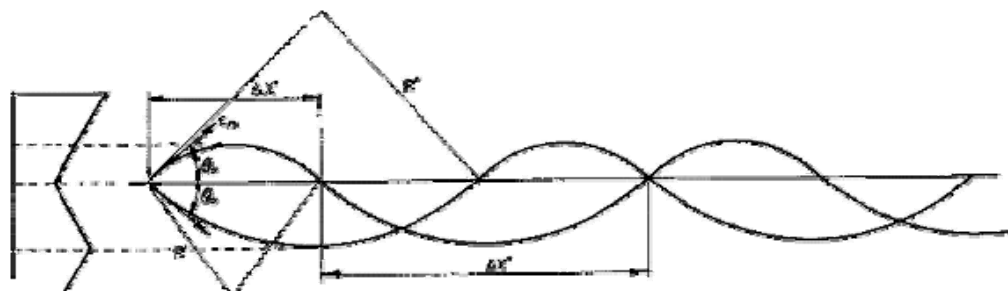


Figura 5.7. Propagación de rayos en un canal sonoro.

En el eje del canal sonoro la velocidad del sonido es mínima, es decir $c = c_m$. En cualquier punto del canal la velocidad de propagación de la onda está dada por la ley de Snell.:



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

$$c = \frac{c_m \cos \theta}{\cos \theta_0}$$

la componente horizontal de esta velocidad es $c \cos \theta = c_0$ o sea:

$$c_x = \frac{c_m \cos^2 \theta}{\cos \theta_0} \quad 5.27$$

El valor medio de esta velocidad será:

$$\bar{c}_x = \frac{c_m}{\cos \theta_0} \int_0^{\theta_0} \frac{1}{\theta_0} \cos^2 \theta d\theta = \frac{c_m}{2} \left(\frac{1}{\cos \theta_0} + \frac{\tan \theta_0}{\theta_0} \right) \quad 5.28$$

y desarrollando en serie $\sin \theta_0$ y $\cos \theta_0$ nos queda:

$$\bar{c}_x = c_m \left(1 + \frac{\theta_0^2}{6} \right) \quad 5.29$$

donde θ_0 esta en radianes. Por lo tanto, la velocidad media horizontal de los rayos que atraviesan el eje del canal sonoro es siempre mayor que la velocidad mínima del sonido c_m en el eje del canal.

Ejercicio:

La superficie de un canal sonoro está formada por una capa de agua de 100 m de espesor y con unos gradientes de velocidad que se ven en la figura 16.8. Calcular :

- 1) *los máximos ángulos con los cuales un rayo puede atravesar el eje del canal y permanecer dentro del mismo,*
- 2) *la distancia horizontal a la cual estos rayos cruzan el eje del canal,*
- 3) *el tiempo necesario para que un rayo se desplace hasta el segundo cruce, si atraviesa el eje del canal con el ángulo máximo,*
- 4) *el tiempo requerido para que un rayo recorra la misma distancia que en el punto 3) a lo largo del eje del canal,*
- 5) *la diferencia en el tiempo requerido.*

Solución 1º) el gradiente constante de la velocidad en el canal superior es:

$$g' = \frac{1.480 - 1.500}{20} = -1 \text{ m/s} \quad \text{por metro}$$

en el canal inferior:



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

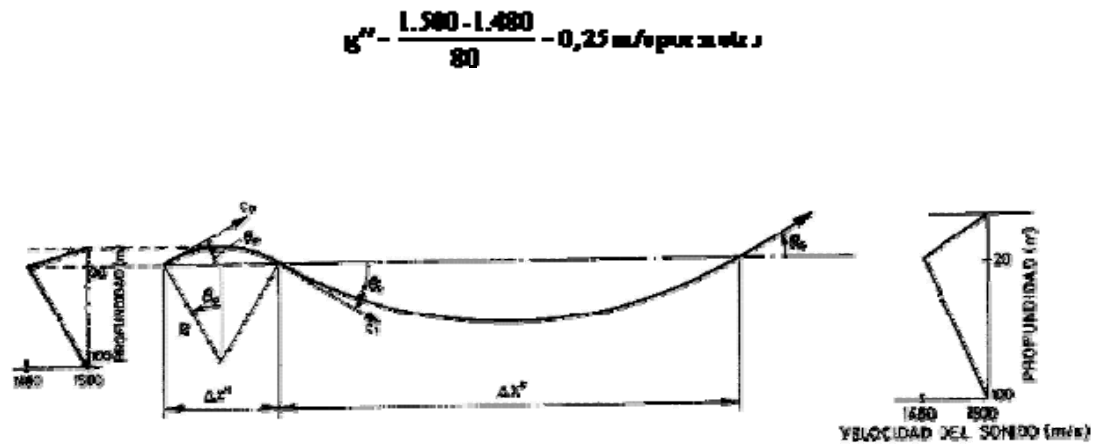


Figura 5.8. Esquema para el ejercicio.

En agua con gradiente de velocidad constante, la distancia horizontal recorrida por un rayo para alcanzar una profundidad d es:

$$z = \sqrt{\frac{2c_1 d}{g}}$$

luego para los canales superior e inferior obtenemos respectivamente:

$$\Delta x_0' = \sqrt{\frac{2c_1 d_1}{g'}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.900 \cdot 20}{1}} = 256 \text{ m}$$

$$\Delta x_0'' = \sqrt{\frac{2c_2 d_2}{g''}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.900 \cdot 80}{0,25}} = 980 \text{ m}$$

El radio R' del arco de circunferencia recorrido por el rayo sonoro es:

$$R' = \frac{c_1}{g'} = 1.500 \text{ m}$$

en el canal superior, y en el canal inferior será:

$$R'' = \frac{c_2}{g''} = 6000 \text{ m}$$

Por otra parte, de acuerdo con la ecuación (16.25):

$$\sin \theta_1 = \frac{\Delta x_0'}{R'} = \frac{256}{1.500} \text{ de donde } \theta_1 = 9,4^\circ$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

$$\sin \theta_2 = \frac{\Delta z_2}{R''} = \frac{980}{2.600} \text{ de donde } \theta_2 = 22,4^\circ$$

siendo este el valor del ángulo máximo, o sea $\theta_1 = \theta_2 = \theta_0$.

2º) las distancias de primero y segundo cruce del eje del canal será:

$$\Delta x' = 2 R' \sin \theta_0 = 492 \text{ m}$$

$$\Delta x'' = 2 R'' \sin \theta_0 = 1.960 \text{ m}$$

3º) el tiempo necesario para desplazarse hasta el segundo cruce será:

$$t_1 = \frac{x}{c_m} = \frac{492 + 1.960}{1.480} = 1,66 \text{ s}$$

4º) el valor de la velocidad media horizontal:

$$\bar{c}_x = c_m \left(1 + \frac{\theta^2}{5} \right) = 1.480 \left(1 + \frac{0,08^2}{5} \right) = 1.481,98 \text{ m/s}$$

$$t_2 = \frac{x}{\bar{c}_x} = \frac{492 + 1.960}{1481,58} = 1,65 \text{ s}$$

5º) la diferencia de tiempo:

$$t_1 - t_2 = 0,01 \text{ s}$$

5. ENMASCARAMIENTO POR RUIDO Y REVERBERACIÓN

En todo lo expuesto anteriormente, las pérdidas por transmisión se han calculado con relación a una posición de referencia (a 1 m del centro efectivo de la fuente sonora).

Para poder predecir los niveles existentes de la señal a una distancia determinada de la fuente, debemos conocer el nivel de presión sonora generado por la fuente a una posición de referencia. El nivel de presión, en dB, relativos a 1 microbar, generados en la posición de referencia



se define como el nivel de la fuente **S**. El nivel de fuente depende principalmente de dos parámetros, de la salida acústica de la fuente W_0 y de su índice de directividad en la transmisión d_t .

Para una fuente omnidireccional de ondas esféricas, la intensidad I en W/m^2 a una distancia de un metro del centro efectivo de la fuente que tiene una salida de W_0 vatios es $I = W_0/4\pi$. La presión efectiva en N/m^2 es:

$$p^2 = \frac{\rho_0 c W_0}{4\pi} = \frac{1,54 \cdot 10^6 W_0}{4\pi}$$

por lo que el nivel de la fuente será:

$$L_s = 20 \log 10 p - 71 + 10 \log W_0 \quad 5.30$$

en dB relativos a 1 microbar (1 microbar = 1 dina/cm² = 0,1 N/m² = 10⁻⁶ atmósferas).

Cuando la fuente es direccional, el nivel de la misma a lo largo de su eje aumenta en su índice de directividad en la transmisión d_t con relación a la fuente sonora omnidireccional de igual potencia acústica de salida, por lo tanto el nivel de la fuente axial será:

$$L_s = 71 + 10 \log W_0 + d_t \quad 5.31$$

En acústica submarina se usan generalmente dos tipos de transductores, uno de ellos tiene una superficie radiante plana, si las dimensiones laterales del transductor son grandes con relación a la longitud de onda el valor del índice de directividad será:

$$d_t = 10 \lg \left[\frac{4\pi S}{\lambda^2} \right] \quad 5.32$$

donde **S** es el área de la superficie radiante del transductor y λ la longitud de onda radiada. El otro tipo común de transductor es el que tiene una superficie radiante cilíndrica, el valor del índice de directividad en este caso es:

$$d_t = 10 \lg \left[\frac{2h}{\lambda} \right] \quad 5.33$$

donde h es la altura del transductor, la ecuación (5.33) es válida siempre que $h > \lambda$.

Además de las anomalías anteriormente mencionadas en la transmisión de las ondas sonoras en el mar, el ruido producido en el medio influye en la recepción de la información. Existen dos tipos básicos de ruido que enmascaran la señal,



- 1) El ruido presente cuando es radiado por el transductor, este tipo comprende el ambiente de ruido en el mar, maquinaria y ruido generado por los barcos, así como turbulencias originadas en la proximidad del transductor.
- 2) El segundo tipo consiste en una multiplicidad de ecos débiles que vuelven de pequeños objetos localizados en el mar, este ruido se refiere a la reverberación.

El ambiente del ruido en el mar, es la suma de todos los ruidos originados y puede representarse por la ecuación:

$$N_f = N_1 - 17 \lg f \quad 5.34$$

donde N_f es el espectro de nivel para una frecuencia f (kHz) y N_1 es el espectro de nivel para una frecuencia de 1 kHz. El nivel efectivo del ruido enmascarante en dB, está dado por:

$$L_N = N_f + 10 \lg \Delta\omega - d_r \quad 5.35$$

donde d_r es el índice de directividad en la recepción del transductor, y $\Delta\omega$ es el ancho de banda del sistema receptor.

Para cada sistema sonar de detección particular, el nivel de eco E , para tener un 50% de probabilidad de detección, puede relacionarse con el nivel de ruido efectivo enmascarante mediante la ecuación:

$$E = L_N + M_N \quad 5.36$$

donde M_N es el reconocimiento diferencial del sistema de detección. En la figura 5.9 vemos el espectro del nivel de presión para un ambiente de ruido en el mar en función de la frecuencia, para seis condiciones distintas de velocidad de viento y estado del mar.

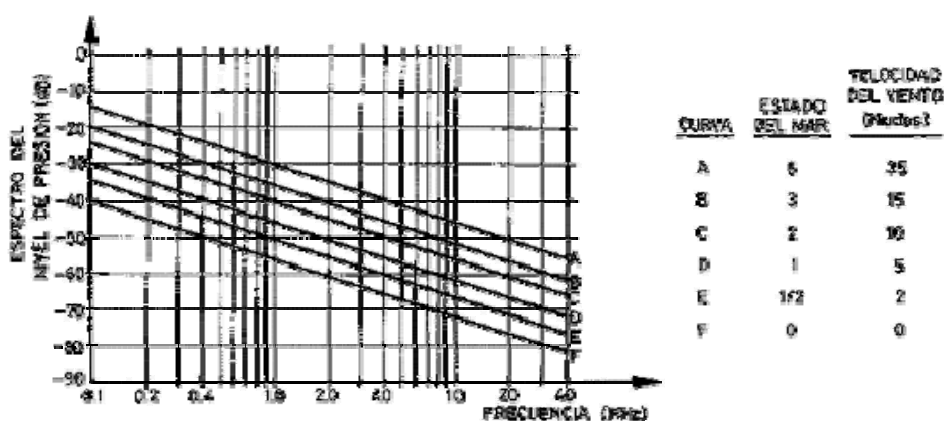


Figura 5.9. Espectro de nivel de presión de un ambiente de ruido en el mar y velocidades de viento.



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

Cuando un impulso de energía sonora se radia en un recinto, se producen reflexiones (ecos) en todas las superficies interiores del mismo, después de un intervalo de tiempo, este fenómeno es el que se reconoce como reverberación.

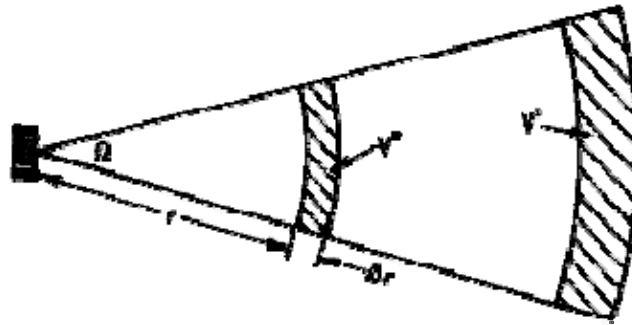


Figura 5.10. Volumen activo que produce reverberación en un tiempo.

Cuando un impulso de energía sonora se radia en el mar, se observan unos fenómenos análogos a los mencionados en un recinto, sin embargo el mar solo tiene dos superficies, el fondo y la superficie, por lo que la reverberación es algo diferente. A diferencia del ruido ambiental, la reverberación o dispersión del fondo está directamente relacionada con la energía transmitida al agua por la fuente, a estas reverberaciones se denominan de fondo y de superficie, y se deben a las reflexiones en el fondo y en la superficie del mar, en cambio se llama reverberación de volumen a la originada por la dispersión en un volumen limitado y no homogéneo, (fig. 5.10).

Si suponemos que el número medio de dispersiones por unidad de volumen es n , que cada dispersor intercepta señales según una sección transversal de área σ y que son interceptadas por los dispersores radiándose uniformemente en todas las direcciones, la reverberación resultante después de un tiempo t de la emisión, tendremos:

$$T_R = 10 \log \left(\frac{4\pi V}{\sigma} \right) \quad (5.37)$$

donde V es el volumen activo $V = \Omega r^2 \Delta r$, el nivel de presión acústica de la reverberación será:

$$L_R = L_S + T_R - 2H$$

Y sustituyendo (5.37) y (5.16) así como:

$$-d_r = +10 \log \left[\frac{\Omega}{4\pi} \right]$$



Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Fundamentos de Acústica

nos queda:

$$L_R = L_S + 10 \log n \sigma + 10 \log \left[\frac{c \Delta t}{2} \right] - d_r - 20 \log r - 2 a r - 2 A' \quad (5.38)$$

donde A' es la transmisión anómala para la reverberación. En este caso el nivel de eco para tener un 50% de probabilidad de detección está relacionado con el nivel de reverberación mediante la ecuación:

$$E' = L_R + M_R \quad (5.39)$$

Donde M_R es el reconocimiento diferencial del sistema de detección para enmascaramiento por reverberación.

Ejercicio:

Un transductor tiene un nivel de intensidad de 125 dB referidos a 1 microbar, y genera pulsos de salida de 0,05 segundos de duración. Tiene una recepción con una direccionalidad de 20 dB cuando radia energía a una frecuencia de 20 kHz. Calcular el nivel de reverberación producido por dispersores de una densidad y tamaño $n \sigma = 10^{-5}$ por metro a un alcance de 2.000 m del objeto sumergido.

Solución: El nivel de reverberación producido por dispersores en agua de mar es de acuerdo con la ecuación (5.38):

$$\begin{aligned} L_T &= 125 + 10 \lg 10^{-5} + 10 \lg \frac{1}{2} (1490 \cdot 0,05) - 20 - 20 \lg 2000 - 2 \cdot 0,004 \cdot 2000 = \\ &= 125 - 50 - 15,6 - 20 - 66 - 16 = -11,4 \text{ dB} \end{aligned}$$
