

**VNIVERSITAT (à)
ID VALÈNCIA (ò) Facultat de Física**
DEPARTAMENT DE TERMODINÀMICA

Asignatura: Contaminación Ambiental
Tema: Contaminación Acústica

Prof. Soledad Gandía

Curso 2003/2004

Contaminación Acústica (I)

Introducción. Descripción física de una onda sonora. Intensidad acústica. Absorción o atenuación del sonido: coeficiente de transmisión. Velocidad de propagación del sonido en un fluido. El oído humano. Cualidades del sonido. Sensación sonora. Adición de niveles sonoros. Curvas equisonoras. Escalas de ponderación.

Introducción

El sonido está formado por ondas que se propagan a través de un medio que puede ser sólido, líquido o gaseoso. El sonido es una onda longitudinal ya que las partículas materiales que lo transmiten oscilan en la dirección de propagación del movimiento.

Cuando arrojamos una piedra al agua la misma genera una serie de ondulaciones en la superficie que se dispersan y propagan hacia todas direcciones. Esto sucede porque las partículas del agua oscilan y transmiten su movimiento a las partículas contiguas sucesivamente en todo el volumen de agua. A una cierta distancia del punto donde se ha generado la onda, ésta se atenúa hasta desaparecer. El sonido llega a nuestros oídos gracias a que las partículas que componen el medio en que estamos (aire, agua) vibran y transmiten su oscilación.

Como el sonido necesita un medio transmisor compuesto de partículas que se empujan unas tras otras podemos deducir que en el espacio interestelar no puede existir sonido ya que no se compone de ningún elemento material que pueda propagar ondas. En el espacio hay lo que llamamos el vacío y sólo se pueden propagar las ondas que no necesitan un sustrato material como son las ondas electromagnéticas. Los astronautas deben comunicarse a través de radiotransmisores porque no podrían escucharse estando muy cerca ni aún gritando fuertemente.

Las ondas sonoras son un tipo de ondas elásticas que tienen como principales características dos propiedades de la materia: la inercia y la elasticidad. Cuando un elemento del medio en que se propaga la onda se desplaza de su posición de equilibrio por la acción de un estímulo externo, se ve sometido a una fuerza de recuperación, ya que es un medio elástico, que hace que tienda a volver a ella. Por otra parte, para que el medio sea capaz de propagar la onda elástica, debe poseer una cierta inercia de forma que cuando el elemento que se ha desplazado vuelve a su posición original, la inercia hace que no se detenga y la cantidad de movimiento que tiene lo desplaza a una posición opuesta a la primera. Cuando el movimiento de una partícula del medio se transmite a las partículas vecinas, aunque con un cierto retraso en el comienzo del movimiento, se dice que se está propagando un sonido.

Para aclarar un poco mejor esta cuestión, supondremos que, en primera aproximación, el medio elástico está constituido por un número muy grande de partículas en equilibrio distribuidas uniformemente en el espacio. Entre estas partículas existen fuerzas de atracción y repulsión de naturaleza más o menos compleja. Este sistema puede ser representado por un conjunto de puntos materiales unidos entre sí por muelles elásticos. Cuando una de las partículas comienza a vibrar, todas las de su entorno lo hacen también aunque con un cierto retraso. La propagación de este movimiento de vibración a todas las partículas es lo que llamamos movimiento ondulatorio o sonido en el caso que nos ocupa.

Es importante señalar que aunque la vibración de las partículas del medio es muy pequeña, la perturbación se extiende hasta el límite del medio a menos que su energía se disipe por

fricciones con el propio medio. Es decir, la onda avanza y se produce una transmisión de energía a pesar de que no hay transporte de materia ya que las partículas del medio apenas se desplazan de su posición inicial y, desde luego, siempre vuelven a ella. El avance de la onda consiste pues en una serie de compresiones y expansiones del medio material en el que se propaga, lo que implica cambios de presión y de densidad en el medio.

Descripción física de una onda sonora

Un sonido puro es aquel que está compuesto por ondas que poseen una frecuencia y longitud de onda iguales en el transcurso del tiempo, es decir, que son constantes. Por ejemplo, la flauta, el silbato, una cuerda de guitarra, una nota en la escala musical, un silbido, etc., pueden emitir ondas puras. En la práctica raras veces se encuentran sonidos puros, pero cualquier perturbación periódica puede descomponerse en suma de sonidos puros. Estudiaremos pues la onda sonora sinusoidal, por ser la componente elemental de cualquier otra onda sonora de tipo periódico.

Como ya sabemos la expresión general de un movimiento ondulatorio es de la forma:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{d^2\Psi}{dy^2} + \frac{d^2\Psi}{dz^2} = \frac{1}{c^2} \left(\frac{d^2\Psi}{dt^2} \right) \quad (1)$$

donde Ψ es la magnitud ondulatoria pertinente (desplazamiento, presión, intensidad del campo eléctrico, etc,..) y c representa la velocidad de propagación de la onda.

En particular, si consideramos una onda plana que avanza en el sentido positivo del eje de las x , la solución de la ecuación anterior es de la forma:

$$\Psi = A \cos(\omega t - kx + \varphi) \quad (2)$$

donde A es la amplitud, k es el número de ondas ($k = 2\pi/\lambda$ siendo λ la longitud de onda), ω es la pulsación ($\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$, siendo ν la frecuencia y T el periodo) y φ es el desfase que tiene en cuenta las condiciones iniciales del movimiento y que a efectos prácticos supondremos cero, lo que no es más que hacer una elección del origen de tiempos y espacios. La ecuación que relaciona c , λ , y ν es: $c = \lambda\nu$. En la figura 1 se muestra una onda de frecuencia 4 hertz, es decir, en un segundo se producen cuatro oscilaciones completas. Correspondería a la vibración de una partícula situada en una posición x fija.

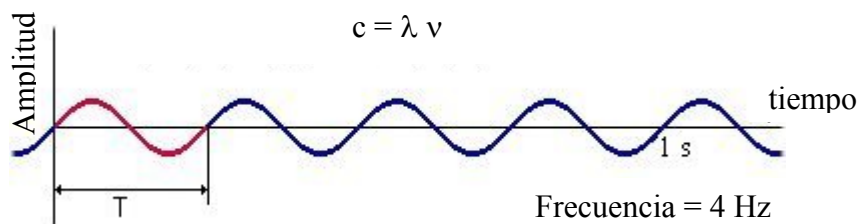


Figura 1

Es importante señalar que no debemos confundir la velocidad de propagación de la onda sonora, c , que es constante, con la velocidad individual de las partículas del medio en su movimiento de vibración, u , que cambia con el tiempo. En el caso del sonido en el aire, aunque depende de la temperatura como veremos, c vale alrededor de 340 m s^{-1} . En el agua la velocidad de propagación del sonido está en torno a los 1500 m s^{-1} .

Como ya hemos indicado, las vibraciones longitudinales que constituyen una onda sonora originan variaciones periódicas de la presión (aumentos y disminuciones de presión alrededor

de un valor medio). La región donde se propaga el sonido recibe el nombre de campo acústico. Ya que las variaciones de presión pueden medirse con relativa facilidad, todas las magnitudes del campo acústico suelen venir expresadas en función de la presión.

Si tomamos como magnitud Ψ los desplazamientos, s , de una partícula del medio respecto a su posición de equilibrio, la ecuación anterior se convierte en:

$$s = A \cos(\omega t - kx) \quad (3)$$

La velocidad instantánea de dicha partícula será:

$$u = \frac{ds}{dt} = -A \omega \sin(\omega t - kx) = -U \sin(\omega t - kx) \quad (4)$$

expresión donde a la velocidad máxima la hemos llamado U y recibe el nombre de amplitud de la velocidad de vibración y es una de las magnitudes que caracterizan el campo acústico.

$$U = A \omega = 2\pi \nu A \quad (5)$$

La aceleración instantánea de una partícula será:

$$a = \frac{du}{dt} = -A \omega^2 \cos(\omega t - kx) \quad (6)$$

por lo que, como se muestra en la figura 2, la fuerza que actúa sobre un elemento de volumen dV del medio material, que supondremos homogéneo de densidad constante ρ , de base dS perpendicular a la dirección de propagación de la onda y de altura dx (en la dirección de propagación) será el producto de la masa de dicho elemento por la aceleración, es decir:

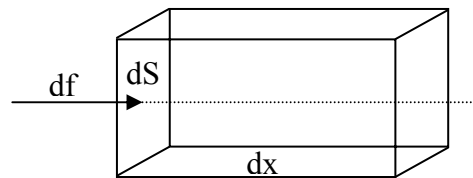


Figura 2

$$df = a dm = a \rho dV = a \rho dS dx = -A \omega^2 \rho dS dx \cos(\omega t - kx) \quad (7)$$

El cociente entre df y dS será el incremento de presión que el paso de la onda origina en el medio:

$$dp = \frac{df}{dS} = -A \omega^2 \rho \cos(\omega t - kx) dx \quad (8)$$

e integrando esta expresión, obtenemos la presión que actúa sobre las bases del volumen elemental:

$$p = \frac{A \omega^2 \rho}{k} \sin(\omega t - kx) + \text{constante} \quad (9)$$

La constante de integración representa físicamente el valor de la presión p_0 que actúa cuando no hay perturbación, y, poniendo el valor de ω y k en función de λ y ν y utilizando la expresión que nos da la velocidad de propagación de la onda ($c = \lambda/T$):

$$\Delta p = p - p_0 = 2\pi \nu A c \rho \sin(\omega t - kx) = P \sin(\omega t - kx) \quad (10)$$

donde Δp representa las variaciones de presión producidas en el medio elástico por el paso de la onda sonora y P es la amplitud de la onda de presión. Tanto Δp como P se miden en "pascales" (Pa).

La amplitud de la onda de presión depende tanto de las características del medio elástico por el que se propaga la onda sonora como de su intensidad (relacionada con la amplitud de

vibración, A , y con el periodo, T). Así podemos considerarla como el producto de dos términos, uno relacionado con el medio, (ρc) que recibe el nombre de resistencia o impedancia acústica y se representa por la letra Z , midiéndose en “ohmios acústicos” o Rayls (1Ω acústico = $1 \text{ Rayl} = \text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) y el otro relacionado con la propia onda, $(2\pi \nu A)$ y que coincide con la amplitud de la velocidad de vibración, U .

$$P = (\rho c)(2\pi \nu A) = Z U \quad (11)$$

Esta última expresión recibe el nombre de Ley de Ohm acústica, por su analogía con la ley de Ohm de la electricidad y relaciona las magnitudes básicas del campo acústico. En ella U juega el papel de la intensidad de corriente, P el de la fuerza electromotriz o diferencia de potencial y Z el de resistencia eléctrica y por esta razón se mide también en ohmios, en este caso acústicos. Sin embargo, a pesar de las analogías formales que acabamos de exponer, hay una gran diferencia entre la resistencia eléctrica y la impedancia o resistencia acústica de un medio; en un conductor, la energía se transforma en calor por efecto Joule en virtud de su resistencia eléctrica mientras que respecto a la resistencia acústica sucede lo contrario ya que, cuanto mayor sea Z para el mismo valor de U , la energía transmitida por las partículas, I es mayor como veremos a continuación. Por esta razón, la impedancia acústica tiene más bien el aspecto de una capacidad de propagación en el medio.

Intensidad acústica

Cuando un movimiento ondulatorio se propaga en un medio elástico, las partículas de éste poseen una cierta energía cinética y potencial debida al propio movimiento vibratorio que experimentan. La fuente sonora que inicia la perturbación lanza al espacio una cierta energía por unidad de tiempo o potencia sonora, W , que se mide en vatios. Suponiendo que no se produzcan pérdidas en el medio en que se encuentra, esta energía atravesará cualquier superficie imaginaria cerrada que rodee la fuente. Llamamos intensidad del sonido a la energía que atraviesa la unidad de superficie, perpendicular a la dirección de propagación de la onda sonora, por unidad de tiempo. Se mide en $W \text{ m}^{-2}$. Así:

$$I = \frac{W}{S} = \frac{dE}{S dt} \quad (12)$$

La energía que transporta la onda se puede calcular a partir de la de un elemento de volumen dV con una masa dm y será la suma de las energías cinética y potencial.

$$dE = dE_p + dE_{cin} = dE_{cin} (\text{máx}) = \frac{1}{2} U^2 dm = \frac{1}{2} U^2 \rho dV = \frac{1}{2} U^2 \rho S dx \quad (13)$$

por lo que la intensidad de la onda será:

$$I = \frac{dE}{S dt} = \frac{1}{2} U^2 \rho \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{1}{2} U^2 \rho c = \frac{1}{2} U^2 Z \quad (14)$$

Teniendo en cuenta la ley de Ohm acústica la expresión (14) toma la forma:

$$I = \frac{1}{2} U P \quad (15)$$

o también, eliminando U de (14),

$$I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Z} \quad (16)$$

que es la expresión más utilizada. Como la amplitud de presión es, según (11) proporcional a la amplitud de oscilación y a la frecuencia, de (16) obtenemos:

$$I = \frac{1}{2} \frac{Z^2 (2\pi)^2 A^2 v^2}{Z} = 2 \pi^2 Z A^2 v^2 \quad (17)$$

con lo que se puede ver que la intensidad es proporcional a los cuadrados de la amplitud de vibración y de la frecuencia.

Cuando el medio en que se propaga la onda es isótropo, la velocidad c es la misma en todas las direcciones. Por ejemplo si consideramos la propagación del sonido en el aire, la velocidad de propagación sería constante si no hubiese viento y la temperatura y la humedad fuesen las mismas en todas las direcciones. En ese caso, la propagación del sonido sería según ondas esféricas, es decir, todos los puntos equidistantes del centro de la perturbación se encontrarían en concordancia de fase y constituirían una superficie de onda o lugar geométrico de los puntos que se encuentran en el mismo estado de vibración.

En condiciones ideales, si consideramos una fuente sonora puntual (no direccional) de potencia W , situada en el centro de una esfera de superficie S y radio r , la intensidad del sonido en cualquier punto de la esfera será:

$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (18)$$

Esta expresión nos indica que cuando nos alejamos de un foco sonoro, la intensidad del sonido disminuye con el cuadrado de la distancia al foco emisor. Si consideramos dos puntos situados a distancias r_1 y r_2 del foco, la relación entre las intensidades será:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W/4\pi r_1^2}{W/4\pi r_2^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (19)$$

En realidad la intensidad del sonido disminuye con la distancia al foco emisor más deprisa de lo que indica esta última expresión, ya que siempre existe una cierta absorción de energía por parte del medio que, en última instancia, puede transformarse en calor.

Si se tratara de un foco lineal de longitud L y potencia W , en lugar de ser puntual, la superficie que atravesaría sería un cilindro de superficie ($S = 2 \pi r L$) siendo r la distancia al foco y la intensidad sería:

$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r L} \quad (20)$$

donde vemos que, en este caso, al alejamos del foco sonoro, la intensidad del sonido disminuye con la distancia al foco emisor. Si consideramos dos puntos situados a distancias r_1 y r_2 del foco, la relación entre las intensidades será:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (21)$$

En principio, la potencia de un foco sonoro puede determinarse directamente calculando la energía que pasa por unidad de tiempo a través de una superficie situada a una cierta distancia de la fuente. Los resultados de estas medidas demuestran que las potencias sonoras de la mayor parte de los focos corrientes son extraordinariamente bajas. A continuación mostramos

los ordenes de magnitud de algunos de los sonidos que podemos encontrar a nuestro alrededor a modo de ejemplo:

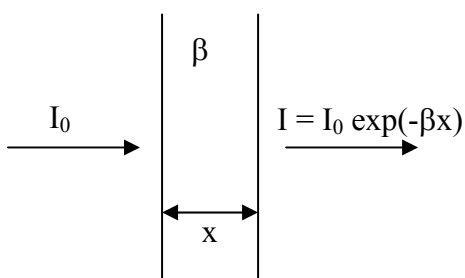
Conversación	0,000007 W
Grito	0,001 W
Fortísimo de trompeta	0,3 W
Sirena de alarma	3000 W

Para remarcar la insignificancia de estas cantidades solo tenemos que observar que si la energía liberada por la trompeta se convirtiera íntegramente en calor se tardaría unas 20 h en calentar 1 litro de agua desde 15 a 20 °C.

No es sorprendente que estas cantidades de energía sean tan pequeñas ya que la amplitud de las vibraciones de las partículas del medio son pequeñísimas, del orden de 10^{-6} o 10^{-7} mm. Lo que es realmente admirable es que nuestro oído pueda detectarlas ya que las variaciones de presión son del orden de 10^{-5} Pa.

Absorción y transmisión del sonido

Cuando una onda atraviesa un medio absorbente, como se muestra en la figura 3, la experiencia demuestra que, al alejarnos del foco emisor, experimenta una disminución de intensidad, $-dI$, que viene dada por la relación:



$$-dI = \beta I dx \quad (22)$$

en función del espesor dx del medio atravesado, siendo el coeficiente de proporcionalidad β el llamado coeficiente de absorción del medio.

Si separamos variables:

$$-\frac{dI}{I} = \beta dx \quad (23)$$

Figura 3

e integramos con la condición de contorno de que al llegar al medio absorbente, es decir para $x = 0$, la intensidad de la onda es I_0 , obtenemos la ecuación:

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\beta x \quad (24)$$

que se puede escribir como:

$$I = I_0 \exp(-\beta x) \quad (25)$$

La expresión (25) nos da la intensidad de la onda que atraviesa un medio absorbente en función de la intensidad incidente en el medio, el coeficiente de absorción y el espesor del medio. Esta expresión representa la ley general de la absorción de cualquier fenómeno en su propagación a través de un medio absorbente y también se conoce como la ley de Beer.

En lugar del coeficiente de absorción, a veces se utiliza el concepto de espesor de semiabsorción, D , que es el espesor que debe tener el material para que la intensidad transmitida a su través sea la mitad de la intensidad incidente.

Si introducimos este término en la ecuación (25), tenemos:

$$\frac{I_0}{2} = \exp(-\beta D) \Rightarrow D = \frac{\ln 2}{\beta} = \frac{0,693}{\beta} \quad (26)$$

El fenómeno de la absorción tiene lugar en todos los movimientos ondulatorios pero casi siempre es de carácter selectivo, es decir, el coeficiente de absorción β depende de la frecuencia de la perturbación que se propaga en el medio y por lo tanto, ondas de frecuencias distintas no se debilitan igual al atravesar el mismo espesor.

En la tabla 1 que mostramos a continuación se dan los coeficientes de absorción en función de la frecuencia para diferentes materiales.

Tabla 1

Material absorbente	Espesor (cm)	Distancia a la pared (cm)	Coeficiente de absorción, $\beta/2$		
			128 Hz	512 Hz	2048 Hz
Absorbentes porosos					
Tapizados de fieltro	1.5	0	0.080	0.380	0.750
Ídem separado de la pared	1.5	5	0.250	0.680	0.800
Fajas solapadas de fibra de vidrio	3	0	0.100	0.700	0.700
Placas de fibra de madera	1.3	5	0.200	0.300	0.350
Placas de construcción ligera	2.5	0	0.150	0.350	0.500
Ídem	5	0	0.200	0.400	0.550
Ídem	5	0	0.250	0.450	0.600
Lana de escorias suelta	5	0	0.220	0.580	0.600
Absorbentes vibrantes					
Hojas de aluminio	-	5	0.100	0.450	0.450
Vidrio en ventanas	0.3	-	0.200	0.100	0.020
Papel de embalar	-	5	0.080	0.480	0.150
Contrachapado de madera	0.3	5	0.250	0.180	0.100
Lienzo encerado	-	5	0.100	0.400	0.050
Paramentos					
Superficies pulidas de piedra (mármol)	-	-	0.010	0.010	0.015
Superficie de agua	-	-	0.008	0.013	0.020
Chapas metálicas	-	-	0.021	0.015	0.004
Hormigón	-	-	0.010	0.016	0.023
Revoque liso de cal sobre mampostería	-	-	0.018	0.018	0.032
Revoque liso de yeso sobre mampostería	-	-	0.013	0.020	0.040
Linóleo sobre cemento	-	-	0.020	0.030	0.040
Revoque rústico de cal	-	-	0.020	0.034	0.028
Empapelado de pared sobre capa de papel	-	-	0.020	0.040	0.040
Piedra artificial	-	-	0.020	0.050	0.070
Pavimento de goma sobre cemento	0.5	0	0.040	0.080	0.030
Enablado de madera	-	-	0.098	0.100	0.082
Guarnecidos					
Muselina (50 g m ⁻²)	-	-	-	0.019	-
Telas de algodón(50 g m ⁻²)	-	-	0.040	0.130	0.320
Esteras	-	0	0.020	0.050	0.270
Alfombras anudadas	-	0	0.050	0.100	0.420
Alfombras de lana	-	0	0.040	0.150	0.520
Mobiliario					
Butaca de madera	-	-	0.014	0.016	0.019
Butaca tapizada de cuero	-	-	0.130	0.149	0.066

Butaca tapizada en pana	-	-	0.280	0.280	0.340
Un hombre	-	-	0.210	0.450	0.710

La energía sonora transmitida por una superficie de separación entre dos medios cuyas impedancias son Z_1 y Z_2 , viene dada por lo que se llama el factor de transmisión, que es la relación entre la energía transmitida y la incidente; dicho factor de transmisión depende de la

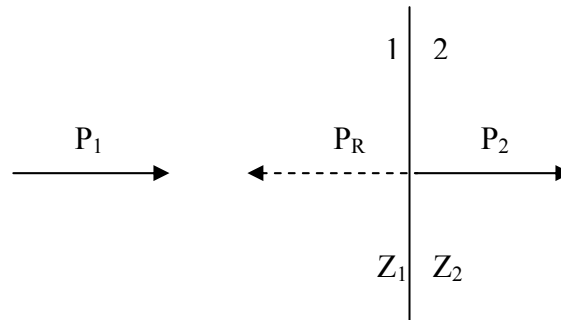


Figura 4

relación entre las impedancias de ambos medios. En la figura 4 se muestra un esquema en el que aparece la superficie de separación entre dos medios, el 1 y el 2, con impedancias acústicas Z_1 y Z_2 respectivamente.

La amplitud de presión que llega a la superficie de separación, la que es reflejada por la misma y la que es transmitida las llamaremos P_1 , P_R y P_2 respectivamente como se ve en la figura.

Se tiene que cumplir que

$$P_1 = P_R + P_2 \quad (27)$$

y el principio de conservación de la energía impone que la intensidad de la onda incidente debe ser igual a la suma de las intensidades de la onda reflejada y transmitida:

$$I_1 = \frac{1}{2} \frac{P_1^2}{Z_1} = I_R + I_2 = \frac{1}{2} \frac{P_R^2}{Z_1} + \frac{1}{2} \frac{P_2^2}{Z_2} \quad (28)$$

Simplificando, obtenemos:

$$\frac{P_1^2}{Z_1} = \frac{P_R^2}{Z_1} + \frac{P_2^2}{Z_2} \quad (29)$$

Si sustituimos el valor de P_R obtenido de la ecuación (27) en la ecuación (29), desarrollamos el cuadrado, reducimos términos y dividimos por P_2 , obtenemos:

$$\frac{P_1^2}{Z_1} = \frac{(P_1 - P_2)^2}{Z_1} + \frac{P_2^2}{Z_2} \quad \rightarrow \quad \frac{P_1^2}{Z_1} = \frac{(P_1^2 - 2P_1P_2 + P_2^2)}{Z_1} + \frac{P_2^2}{Z_2}$$

$$\frac{P_1^2}{Z_1} = \frac{P_1^2}{Z_1} - \frac{2P_1P_2}{Z_1} + \frac{P_2^2}{Z_1} + \frac{P_2^2}{Z_2} \quad \rightarrow \quad \frac{2P_1P_2}{Z_1} = P_2^2 \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right)$$

$$P_2 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} P_1 \quad (30)$$

La expresión (30) nos proporciona la amplitud de la onda de presión transmitida conocida la de la onda incidente y la impedancia de ambos medios. La correspondiente intensidad, será:

$$I_2 = \frac{1}{2} \frac{P_2^2}{Z_2} = \frac{1}{2} \frac{4 Z_2 P_1^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (31)$$

Definimos el coeficiente de transmisión, T como:

$$T = \frac{I_2}{I_1} = \frac{\frac{1}{2} \frac{4 Z_2 P_1^2}{(Z_1 + Z_2)^2}}{\frac{1}{2} \frac{P_1^2}{Z_1}} = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{4 \frac{Z_2}{Z_1}}{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2} \quad (32)$$

Si llamamos a la relación $r = \frac{Z_2}{Z_1}$, relación de impedancias, el coeficiente de transmisión nos queda de la forma:

$$T = \frac{4r}{(1+r)^2} \quad (33)$$

En esta expresión observamos que si la relación de impedancias es próxima a la unidad, es decir los dos medios tienen una impedancia semejante, el coeficiente de transmisión de la onda es casi la unidad, lo que nos dice que casi toda la intensidad sonora del medio 1 ha sido transmitida al medio 2. Por el contrario, tanto en el caso de que la impedancia del medio 2 sea mucho mayor que la del medio 1 ($r \rightarrow \infty$) como en el caso contrario ($r \rightarrow 0$), el coeficiente de transmisión tiende a cero y la energía transportada por la onda incidente es reflejada.

Así, por ejemplo, cuando una onda sonora procedente del aire ($Z_1 = 420$ ohms acústicos) penetra en el agua ($Z_2 = 16 \cdot 10^5$ ohms acústicos), la relación de impedancias vale $r = 3800$ y el factor de transmisión es solo de 0,001, lo que quiere decir que solo el 1 por 1000 de la energía incidente penetra en el agua.

Evidentemente, la parte de la energía sonora incidente que no penetra en el medio 2, es reflejada al medio 1 y el coeficiente de reflexión será:

$$R = 1 - T = 1 - \frac{4r}{(1+r)^2} = \frac{(r-1)^2}{(r+1)^2} \quad (34)$$

y en el ejemplo que hemos puesto $R = 0,999$, es decir, el 99,9 de la energía incidente es devuelta al aire.

Velocidad de propagación de las ondas sonoras en un fluido

La velocidad de propagación de las ondas mecánicas en un medio elástico viene dada por la expresión:

$$c = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (35)$$

donde Y es un parámetro elástico del medio material en que se propagan las ondas, diferente según el medio sea sólido, líquido o gas y ρ es la densidad del medio.

Los fluidos tienen elasticidad de volumen pero no de forma. En un fluido solo pueden propagarse bien las ondas longitudinales (ondas acústicas). En este caso, el parámetro Y es el

módulo de elasticidad de volumen K que es el inverso del coeficiente de compresibilidad. Para los líquidos, los valores del coeficiente elástico son del orden de 10^9 Pa, un orden de magnitud menor que en los sólidos mientras que las densidades no difieren tanto de las de los sólidos. El valor de la velocidad de una onda en un líquido es del orden de 1 km s^{-1} y en los sólidos del orden de una decena de km s^{-1} . Por ejemplo, la velocidad de propagación del sonido en el agua es de unos 1500 m s^{-1} y en el acero o el aluminio de, aproximadamente, 6 km s^{-1} .

La velocidad de propagación del sonido en los gases se puede calcular aplicando las leyes de los gases perfectos, si consideramos al medio en que se propaga el sonido un gas perfecto, por ejemplo el aire. Los cambios de presión y de volumen del medio que acompañan a la propagación de una onda sonora, pueden considerarse adiabáticos, dada la pequeña conductividad térmica de los gases y la rapidez del proceso. La ecuación de un proceso adiabático reversible de un gas ideal es:

$$pV^\gamma = \text{cte} \quad (36)$$

donde γ es el coeficiente adiabático del gas ($\gamma = c_p/c_v$; c_p y c_v son los calores específicos a presión y a volumen constante respectivamente) que vale 1,4 para los gases diatómicos (como el aire) y 1,6 para los monoatómicos (como el argón).

El valor del módulo de elasticidad de volumen es:

$$K = -V \frac{dp}{dV} = -V \frac{d}{dV} (\text{cte } V^{-\gamma}) = -V (-\gamma \text{cte } V^{-\gamma-1}) = \gamma \text{cte } V^{-\gamma} = \gamma p \quad (37)$$

y la presión de un gas de densidad ρ y masa molecular M que se encuentra a la temperatura absoluta T vale, aplicando la ley de los gases perfectos:

$$p = \frac{\rho RT}{M} \quad (38)$$

donde R es la constante de los gases perfectos que vale $8314 \text{ J kmol}^{-1}\text{K}^{-1}$. Así la velocidad de las ondas sonoras en un gas vale:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \quad (39)$$

de manera que para el aire seco de masa molecular $M = 28,9 \text{ kg kmol}^{-1}$, la velocidad de propagación de las ondas sonoras será la siguiente función de la temperatura:

$$c \text{ (m/s)} = 20.05 \sqrt{T(\text{K})} \quad (40)$$

Por ejemplo, a 20°C (293 K), $c \approx 340 \text{ m/s}$ y a 0°C (273 K) $c = 330 \text{ m/s}$ lo que representa un cambio en la velocidad del orden de $0,5 \text{ m/s}$ por cada grado que cambia la temperatura del aire a temperaturas ordinarias. Este hecho es el responsable de la llamada curvatura del sonido en la atmósfera. El sonido, al propagarse en la atmósfera, se curva hacia arriba a causa de que la temperatura del aire disminuye con la altura y, por lo tanto también disminuye la velocidad con que se propaga (a menos que haya una inversión térmica, o sea un aumento de la temperatura con la altura, en cuyo caso la dirección de propagación se curva hacia el suelo y el efecto resultante es un aumento de los sonidos a nivel del suelo).

Evidentemente, si consideramos el aire atmosférico que es una mezcla de aire y vapor de agua, el valor de γ y de M son diferentes ya que el agua es una molécula triatómica y, por tanto, la velocidad de propagación del sonido en la atmósfera depende de la temperatura y, además, de la humedad del aire. En el apéndice a este tema (fotocopias de la asignatura,

paginas T3-2 / T3-5) se muestran las tablas de dependencia de la absorción y la velocidad del aire en función de la frecuencia del sonido y la humedad del aire.

El oído humano

Como se puede observar en la figura 5 a) y d), en la constitución anatómica del oído humano se pueden distinguir tres partes: el oído externo, el oído medio y el oído interno.

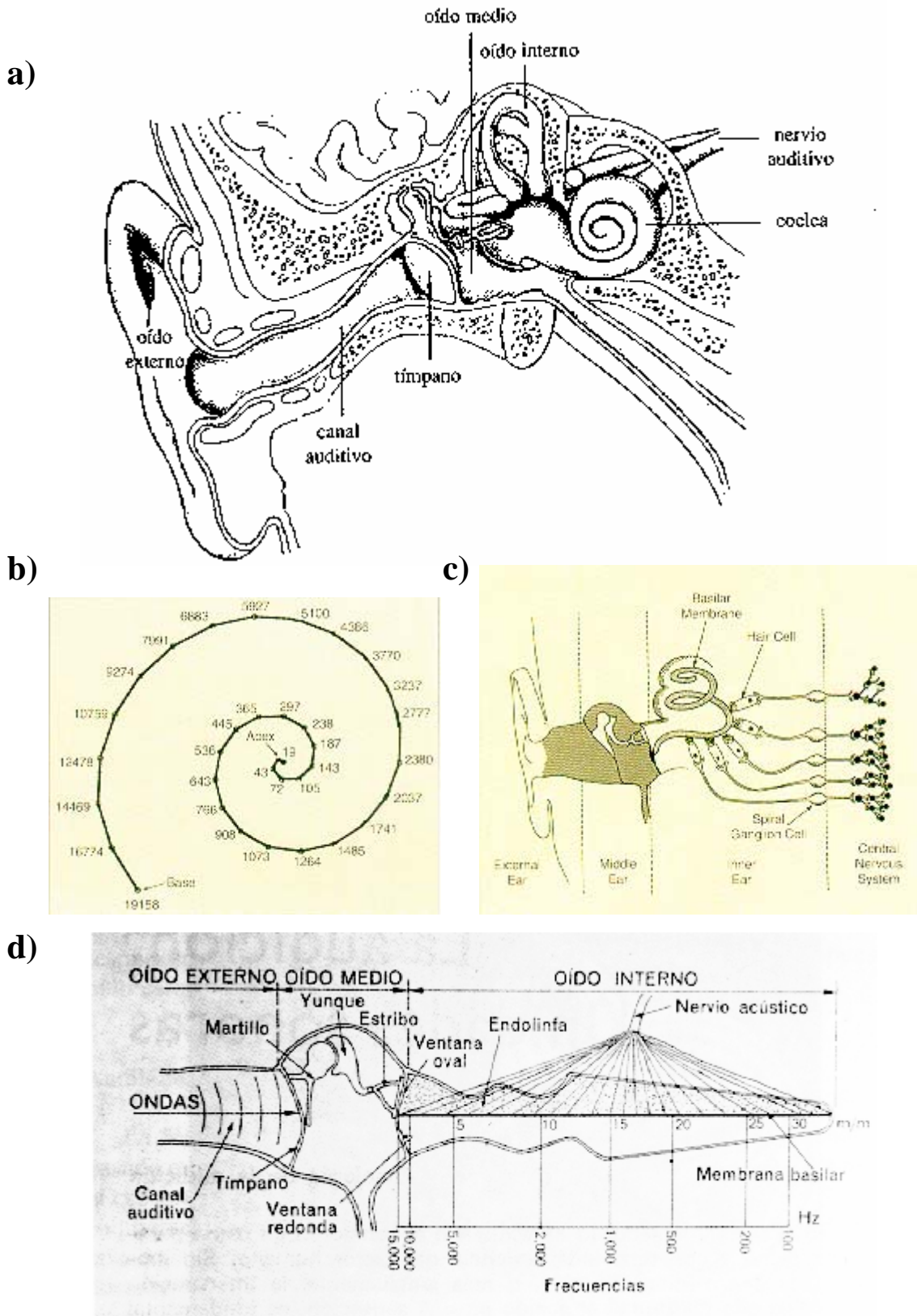


Figura 5

El oído externo está formado por el pabellón auditivo y la membrana del tímpano unidos por el conducto auditivo; las ondas sonoras, recogidas por el pabellón auditivo que funciona como un colector, llegan hasta el tímpano a través del conducto auditivo externo. El tímpano actúa como una membrana microfónica.

El oído medio está formado por una cadena de huesos muy pequeños que se apoya por un extremo en el tímpano cuyas vibraciones recoge y termina en la membrana que recubre la ventana oval. La superficie del tímpano es bastante mayor que la de la ventana oval y la cadena de huesos actúa como amplificador multiplicando por 60 el estímulo sonoro que le llega al tímpano. Esta amplificación es necesaria ya que el paso de la onda sonora desde el oído medio en el que hay aire al oído interno, lleno de un medio acuoso, disminuye la señal ya que como hemos visto en el ejemplo anterior el factor de transmisión de aire a agua es 0,001. Con esta amplificación la vibración que se transmite al oído interno es, aproximadamente, igual a la que llega al oído externo.

En efecto, si P es la amplitud de la onda de presión incidente, la que le llega a la ventana oval a través de la cadena de huesecillos es, aproximadamente, $60 P$ y como la relación de las impedancias entre la del aire y la del agua es 3600, tendremos:

$$I_1 = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Z_1}; I_2 = \frac{1}{2} \frac{P_2^2}{Z_2} \cong \frac{1}{2} \frac{(60 P)^2}{3600 Z_1} = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Z_1} = I_1 \quad \Rightarrow \quad I_2 \cong I_1 \quad (41)$$

es decir la intensidad física en el aire será aproximadamente igual a la que le llega al medio acuoso existente en el oído interno.

La presión del aire en el oído medio se mantiene igual a la externa que actúa sobre el otro lado del tímpano gracias a la trompa de Eustaquio que pone en comunicación el oído con la parte superior de la garganta.

El oído interno está formado por los canales semicirculares (que tienen un importante papel en el equilibrio) y el caracol o cóclea. Éste último es una especie de espiral - figura 5 b)- que desarrollada, como se ve en la figura 5 d), tiene unos 30-35 mm y está dividido longitudinalmente por una membrana flexible, llamada membrana basilar, sobre la que están distribuidos los filamentos terminales del nervio auditivo o fibras de Corti cuyo número es del orden de 26.000 -figura 5 c). A diferencia del oído medio y externo, el oído interno contiene un líquido acuoso linfático, a través del cual se transmiten las vibraciones que penetran por la ventana oval; las vibraciones se producen conjuntamente en todo el fluido coclear y son recogidas por la membrana basilar de forma que según la frecuencia y la intensidad del sonido afectan a unas fibras nerviosas o a otras, las cuales transforman el impulso mecánico en una señal que es transmitida al cerebro. Así se explica la atrofia del oído para determinados sonidos en algunas profesiones ya que el uso continuado de determinadas zonas de la membrana basilar produce un desgaste que impide la recepción del impulso.

Cualidades del sonido

Las ondas a las que llamamos sonoras son las que pueden estimular al oído y al cerebro humano dentro de ciertos límites que van, aproximadamente, desde 16 ciclos por segundo hasta cerca de 20.000 ciclos por segundo. Estos son los límites audibles por el oído humano y las ondas de sonido inferiores al límite audible se llaman infrasónicas o subsónicas y las que superan el límite superior se llaman ultrasónicas. Los perros son sensibles a frecuencias de hasta 30.000 ciclos por segundos y los murciélagos a frecuencias de hasta 100.000, es decir, que estos animales escuchan sonidos ultrasónicos.

La percepción humana de un sonido depende de varios factores, llamados cualidades del sonido, que son la intensidad, el tono y el timbre. Estas cualidades son las que nos permiten distinguir un sonido de otro.

Según la primera cualidad, la intensidad, clasificamos los sonidos en fuertes o débiles. Está relacionada con la amplitud y la frecuencia del movimiento vibratorio.

La figura 6 muestra la comparación entre un sonido suave y uno más fuerte de la misma frecuencia. Se puede observar que el sonido fuerte (de gran amplitud) alcanza puntos más altos de nivel de presión sonora (SPL) que el sonido suave (de baja amplitud). Si se alcanzan extremos de nivel de presión sonora (SPL), la presión puede ser tan alta que llega a dañar el oído, al igual que si se tratara de un golpe físico.

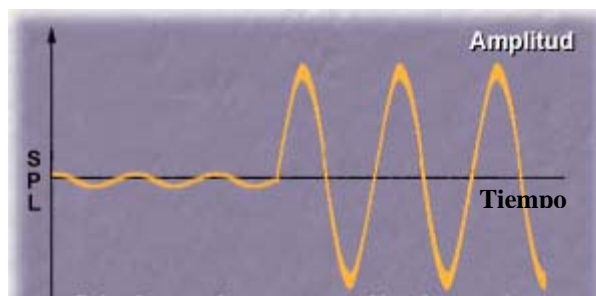


Figura 6

El tono o altura es la cualidad que nos permite distinguir entre sonidos agudos y graves.

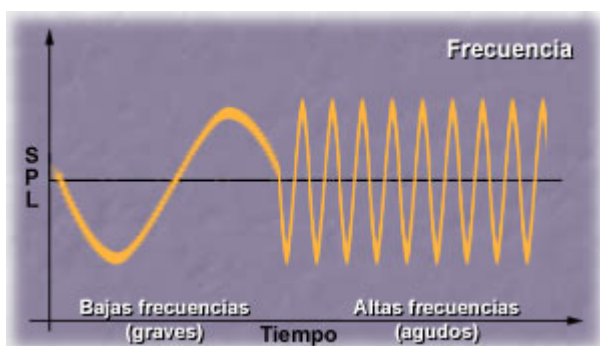


Figura 7

Físicamente esta cualidad se corresponde con la frecuencia del sonido. Así un sonido agudo es aquel cuya frecuencia es alta (produce muchas oscilaciones por unidad de tiempo) y uno grave es el que tiene una frecuencia baja (pocas oscilaciones por unidad de tiempo). En la figura 7 se muestra dos sonidos de la misma intensidad (la amplitud de la onda es la misma: el eje y muestra la amplitud de presión) pero de diferente tono (uno grave y el otro agudo ya que en el mismo tiempo sufre muchas más oscilaciones).

El timbre es la cualidad por la que podemos distinguir dos sonidos de la misma intensidad y tono (frecuencia) procedentes de dos focos distintos. El timbre es debido a que los sonidos no son, generalmente, sonidos puros y las ondas sonoras son el resultado de la superposición de ondas, llamados armónicos, a una onda fundamental. En los sonidos musicales, la frecuencia de estos armónicos es un múltiplo de la frecuencia del sonido fundamental.

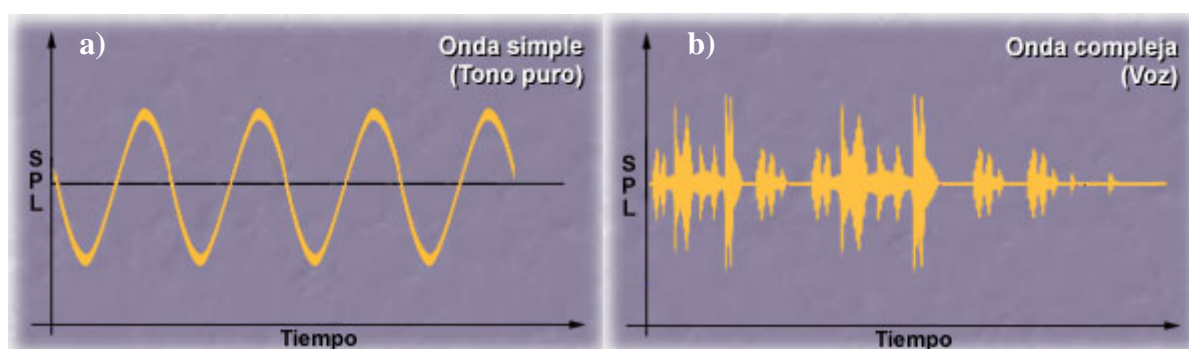


Figura 8

En la figura 8 a) se muestra una representación de una onda simple con una única frecuencia y una única amplitud. Este es el sonido que se puede oír cuando se hace sonar un diapasón. En la misma figura a la derecha (b) se muestra una onda compleja, como la que pudiera crear el habla humana. Se puede observar que es muy difícil extraer conclusiones sobre la señal porque la amplitud cambia constantemente con el tiempo.

Si representamos las diferentes frecuencias que aparecen en un sonido y su amplitud, obtenemos lo que se llama un espectro del sonido. La mayoría de los sonidos naturales no contienen una sola frecuencia de una sola amplitud, sino que contienen muchas frecuencias y cada una de ellas de una distinta amplitud. Esta calidad del sonido que llamamos timbre es lo que hace que el sonido de un trombón y el de un clarinete sean diferentes incluso si tocan la misma nota. En la figura 9 se muestra lo que podría ser el espectro de una única nota emitida con un diapasón y el espectro de un sonido complejo. El espectro de frecuencia de una onda compleja muestra muchos componentes de frecuencia, cada uno con distinta amplitud.

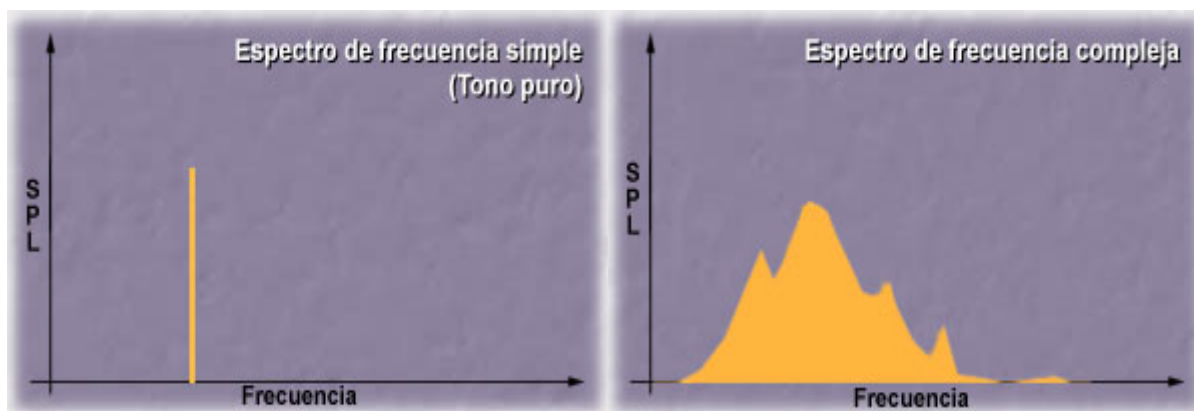


Figura 9

Sensación sonora

Las vibraciones capaces de producir sonidos tienen unas magnitudes susceptibles de ser medidas físicamente, siendo éstas entre otras la intensidad sonora absoluta y el nivel de presión sonora. El efecto que producen estas vibraciones al llegar al aparato auditivo lo definimos como sonido y debido a que nos encontramos ante una sensación, no existe una relación causa-efecto lineal. Es decir cuando dos focos idénticos emiten simultáneamente, la sensación sonora que percibimos no es el doble de la que percibiríamos si actuase un solo foco. Esto, que es un problema de nuestro sistema de audición, fue observado por los científicos Weber y Fechner, al investigar sobre el desarrollo del teléfono en los laboratorios de la Bell Telephone, dando a conocer la llamada ley psico-física de Weber-Fechner y que dice: “nuestras impresiones sonoras varían según una progresión aritmética, cuando las excitaciones físicas que las causan varían según una progresión geométrica”. Esto es lo mismo que expresar que la magnitud de la sensación percibida, que llamaremos L , es proporcional al logaritmo del estímulo que lo provoca, es decir la intensidad del sonido, lo que se expresaría como:

$$L = K \log I \quad (42)$$

Donde K es una constante adimensional. Como la intensidad mínima correspondiente al umbral de audición del oído humano es $10^{-12} \text{ W m}^{-2}$ y la máxima de 10^5 W m^{-2} , los niveles correspondientes a los valores extremos de intensidad son para $K = 1$:

$$I = 10^{-12} \text{ W m}^{-2} \quad L = -12 \quad (43)$$

$$I = 10^5 \text{ W m}^{-2} \quad L = 5 \quad (44)$$

Para que la escala sea siempre positiva y que el nivel obtenido sea adimensional, se toma como intensidad de referencia $I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$, que es el umbral de audición para sonidos de 1000 Hz en el aire y para el cual dejamos de percibir el sonido, por lo que $L_0 = 0$, y la expresión de Weber (42) queda:

$$L - L_0 = K (\log I - \log I_0) \quad (45)$$

$$L = K \log \frac{I}{I_0} = K \log \frac{I}{10^{-12}} \quad (46)$$

De esta forma los límites inferior y superior de la escala de niveles, para $K = 1$, quedan $L_{\text{inf}} = 0$ y $L_{\text{sup}} = 17 K$

La escala de niveles de 0 a 17 se denomina escala de bels o belios, llamándose así cada una de sus divisiones.

Para que estas unidades no precisen decimales se trabaja con la escala de decibelios, obtenida haciendo $K = 10$ y quedando los límites superior e inferior en 0 y 170 dB.

Así, se define el nivel de intensidad en decibelios como:

$$LI = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (47)$$

Aunque se pueden percibir sonidos con intensidades hasta 10^5 W m^{-2} , lo cierto es que a partir de 1 W m^{-2} se produce una sensación dolorosa, por lo que este valor se ha fijado como el máximo tolerable para el oído humano, que corresponde a un nivel de intensidad:

$$LI = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 120 \text{ dB} \quad (48)$$

Por tanto, el campo audible usual se extiende entre 0 y 120 dB, teniendo en cuenta que el cero es una referencia a nuestro umbral de audibilidad y no significa ausencia de sonido; solo indica que el sonido en cuestión es igual a nuestro nivel de referencia.

El decibelio, en consecuencia, es una unidad que sirve para medir o expresar matemáticamente la sensación de intensidad acústica.

Como la intensidad sonora esta relacionada con el cuadrado de la amplitud de presión, como vimos en la ecuación (16), se puede definir el nivel de presión sonora (LP) como:

$$LP = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (49)$$

este nivel se define de manera que coincida con el nivel de intensidad en un mismo medio y así:

$$LI = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{P^2/z}{P_0^2/z_0} = 20 \log \frac{P}{P_0} + 10 \log \frac{z_0}{z} \quad (50)$$

Luego, si la impedancia del medio de referencia (z_0) coincide con la del medio donde se realiza la medición, z , el nivel de intensidad coincide con el de la presión ($LI = LP$). Normalmente se considera como medio de propagación el aire ($P_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$) y se cumple:

$$LP = 20 \log \frac{P}{2 \cdot 10^5} \quad (51)$$

También se puede expresar la sensación sonora en función de la potencia acústica de la fuente, supuesta puntual. Para determinar la potencia acústica que radia una fuente se utiliza un sistema de medición alrededor de la fuente sonora a fin de poder determinar la energía

total irradiada en todas direcciones. La potencia acústica es un valor intrínseco de la fuente y no depende del local donde se halle. Es como una bombilla de 100 W de potencia: siempre tendrá 100 W; la pongamos en nuestra habitación o la pongamos dentro de una nave enorme su potencia siempre será la misma. Con la potencia acústica ocurre lo mismo: el valor no varía por estar en un local reverberante o en uno seco. Al contrario de la presión acústica, que sí que varía según varíen las características del local donde se halle la fuente, la distancia etc.

Así, el nivel de potencia sonora de una fuente de W vatios de potencia, se expresará como:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (52)$$

donde W_0 es la potencia de referencia que se toma como $1 \text{ pW} = 10^{-12} \text{ W}$, lo que supone obtenerla a partir de la intensidad de referencia medida sobre una superficie de 1 m^2 , que para una fuente puntual corresponde a una distancia a la fuente de 0.28 m ($d = \sqrt{\frac{1 \text{ m}^2}{4\pi}} = 0.28 \text{ m}$).

Con esta consideración se puede relacionar los niveles de intensidad y potencia por la expresión:

$$LI = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{W/4\pi r^2}{W_0/1\text{m}^2} = 10 \log \frac{W}{W_0} - 10 \log 4\pi r^2 \quad (53)$$

$$LI = L_w - 20 \log r - 10 \log 4\pi = L_w - 20 \log r - 11$$

Adición de niveles sonoros

Los decibelios no se pueden sumar directamente. Si un foco emite un sonido de 1000 Hz tal que percibimos una sensación sonora o nivel de intensidad sonora de 100 dB, si se añade otro foco emitiendo un sonido de las mismas características, la sensación sonora que percibiremos **no** es de 200 dB ya que la intensidad que nos llega con un solo foco será:

$$LI(1) = 100 \text{ db} = 10 \log \frac{I}{10^{-12}} \Rightarrow I = 10^{-2} \text{ W m}^{-2}$$

mientras que con dos focos, la intensidad será doble $I = 2 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-2}$ y percibiremos un nivel de intensidad sonora:

$$LI(2) = 10 \log \frac{2 \cdot 10^{-2}}{10^{-12}} = 103 \text{ db}$$

Generalizando el procedimiento, diremos que si $LI(1)$ es el nivel sonoro de una fuente de intensidad I_1 :

$$LI(1) = 10 \log \frac{I_1}{I_0} \Rightarrow I_1 = I_0 \cdot 10^{\left(\frac{LI(1)}{10}\right)} \quad (54)$$

y $LI(2)$ es el nivel sonoro de una fuente de intensidad I_2 :

$$LI(2) = 10 \log \frac{I_2}{I_0} \Rightarrow I_2 = I_0 \cdot 10^{\left(\frac{LI(2)}{10}\right)} \quad (55)$$

el nivel que se obtiene al considerar las dos fuentes juntas, con una intensidad $I_1 + I_2$, será:

$$LI(\text{suma}) = 10 \log\left(\frac{I_1 + I_2}{I_0}\right) = 10 \log\left(10^{\left(\frac{LI(1)}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{LI(2)}{10}\right)}\right) \quad (56)$$

También se puede sumar niveles sonoros utilizando la tabla 2 que mostramos a continuación. En ella se muestra la diferencia de niveles entre dos sonidos (ΔLI) en función de la cantidad que tenemos sumar al nivel sonoro más alto (LI_+) para obtener el valor suma de ambos.

Tabla 2

ΔLI (dB)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LI_+ (dB)	3.0	2.5	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0	0.8	0.65	0.5	0.4

Así por ejemplo, si tenemos dos fuentes con 55 dB y 51 dB respectivamente, la tabla nos da el valor de 1.5 que sumaremos a los 55 dB para obtener el nivel sonoro de las dos fuentes juntas, esto es, 56.5 dB.

Hay que observar que a una diferencia $\Delta L = 0$, es decir dos sonidos de la misma intensidad, corresponde un valor de 3 dB, lo que ya habíamos obtenido en el ejemplo tratado anteriormente. Si la diferencia es mayor que 10 dB, la contribución de la fuente más silenciosa puede ser despreciada.

Algunas veces es necesario restar el ruido de fondo del nivel sonoro total. La corrección para el ruido de fondo puede hacerse restando el nivel de ruido de fondo $LI_{(\text{fondo})}$ del nivel total $Lp_{(\text{Tot})}$. El nivel sonoro resultante sería:

$$LI_{(\text{result})} = 10 \log\left(10^{\left(\frac{LI_{(\text{Tot})}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{LI_{(\text{fondo})}}{10}\right)}\right) \quad (57)$$

Si la diferencia entre los niveles sonoros del ruido de fondo y el total es menor de 3 dB, el ruido de fondo es demasiado alto para una medida de precisión y el nivel de ruido correcto no puede hallarse hasta que no se reduzca el nivel de ruido de fondo. Si la diferencia es mayor que 10 dB, el ruido de fondo puede ser ignorado.

Curvas equisonoras

El nivel de presión sonora Lp o de intensidad sonora LI tiene la ventaja de ser una medida objetiva y bastante cómoda de la intensidad del sonido, pero tiene la desventaja de que está lejos de representar con precisión lo que realmente se percibe. Esto se debe a que la sensibilidad del oído depende fuertemente de la frecuencia y se comporta de diferente manera, con respecto a la dependencia de la frecuencia, para diferentes niveles físicos del sonido, es decir, para sonidos de diferente amplitud. Por ejemplo, a muy bajos niveles de intensidad (sonidos débiles), sólo los sonidos de frecuencias medias son audibles, mientras que a altos niveles (sonidos fuertes), todas las frecuencias se escuchan más o menos como si fueran el mismo sonido. A esta característica del sonido por la que dos vibraciones de frecuencia y amplitud diferentes nos parecen iguales la llamaremos sonoridad.

En 1933 Fletcher y Munson elaboraron un gráfico que recoge las líneas isofónicas o de igual nivel de sonoridad realizando experiencias sobre un elevado número de personas (unas 30.000) con audición normal y con edades comprendidas entre los 18 y los 25 años. En estas curvas, que se muestran en la figura 10, se recoge la relación existente entre el nivel de presión sonora, la sonoridad y la frecuencia. El experimento se realizó escuchando un tono puro de 1.000 Hz y comparándolo con otro tono puro de diferente frecuencia variando el nivel

de presión sonora hasta igualar la sensación producida por ambos, dando lugar a las curvas de la figura 10 llamadas también contornos equisonoros.

A lo largo de cada curva los sonidos nos parecerán igualmente intensos, aunque los niveles de presión varíen considerablemente, naciendo la unidad de medida de nivel sonoro o sonoridad que llamamos fon. Característica principal de esta unidad de medida es que es físicamente variable pero, subjetivamente constante, no siendo posible relacionarla matemáticamente con los parámetros físicos que rigen los movimientos vibratorios, siendo obligatorio para ello hacer uso de las tablas o gráficas isofónicas. Para relacionar fonos entre sí se opera igual que con los dB. Por definición el fon es la unidad de nivel de sonoridad y equivale al valor en decibelios (nivel de presión sonora) de un tono puro de 1.000 Hz que produce la misma sensación de sonoridad que el sonido problema de acuerdo con las curvas isofónicas de Fletcher y Munson. (1 Fon = 1 dB a 1.000 Hz)

En la figura 10 se puede observar la diferencia que hay entre fon y decibelio. Para ello basta con fijarnos en la curva umbral de audición a la que le corresponden 0 fonos, es decir, el umbral de audición. A lo largo de esta curva isófona, la sonoridad es nula. Si nos fijamos en un sonido de 1000 Hz, el nivel sonoro que le corresponde es también de 0 decibelios (ya que se ha elegido esta frecuencia para dar valores numéricos a la sonoridad) pero si observamos el punto que en esta curva le corresponde a un sonido de 100 Hz, vemos en el eje de ordenadas que el nivel sonoro es de 25 decibelios aproximadamente y si nos fijamos en un sonido de 10.000 Hz es de solo 10 dB. Otro ejemplo se puede observar en la figura observando que un sonido de 60 dB a 50 Hz tiene la misma sonoridad que otro de 30 dB a 10 kHz, es decir, 20 fonos, que es el número de decibelios que tendría el sonido de 1000 Hz que a nuestros oídos

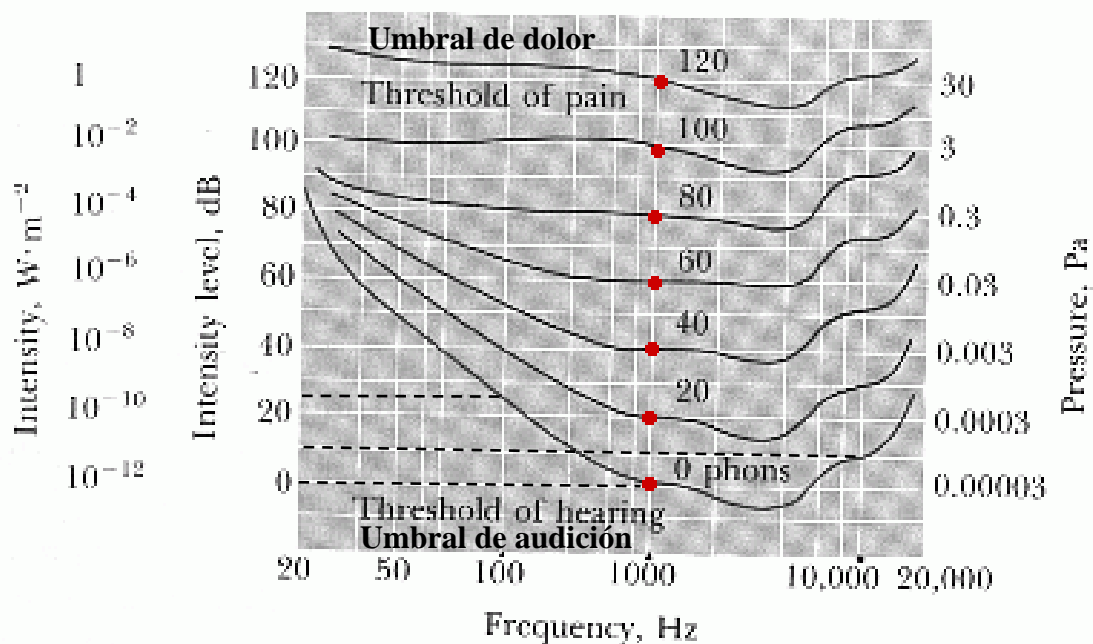


Figura 10

sonaría igual que los dos anteriores. Dos sonidos que tengan el mismo nivel de sonoridad en fonos son percibidos por el oído como si fueran el mismo, aunque sus características físicas (que es lo que objetivamente se puede medir) sean diferentes y decimos que los dos sonidos

tienen la misma sonoridad. No ocurre lo mismo cuando comparamos dos sonidos de diferente nivel en fonos y entonces decimos que tienen diferente sonoridad.

En la figura 11 se muestran las áreas del diagrama nivel sonoro frente a la frecuencia que corresponden a la voz humana y a sonidos musicales.

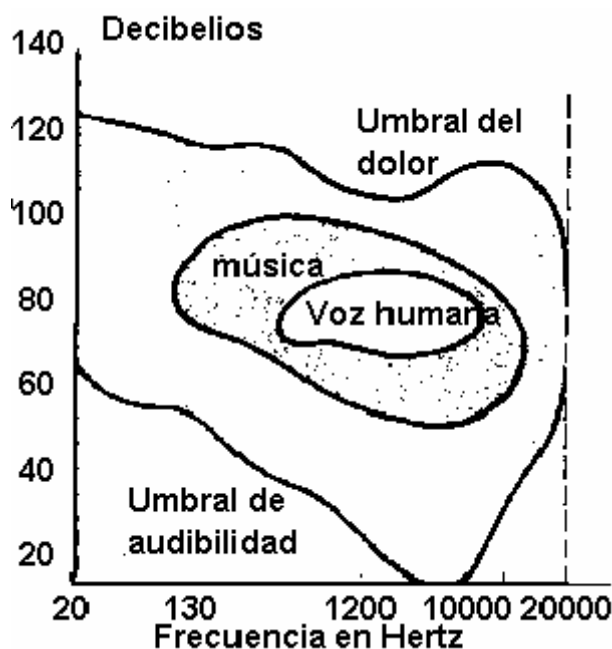


Figura 11

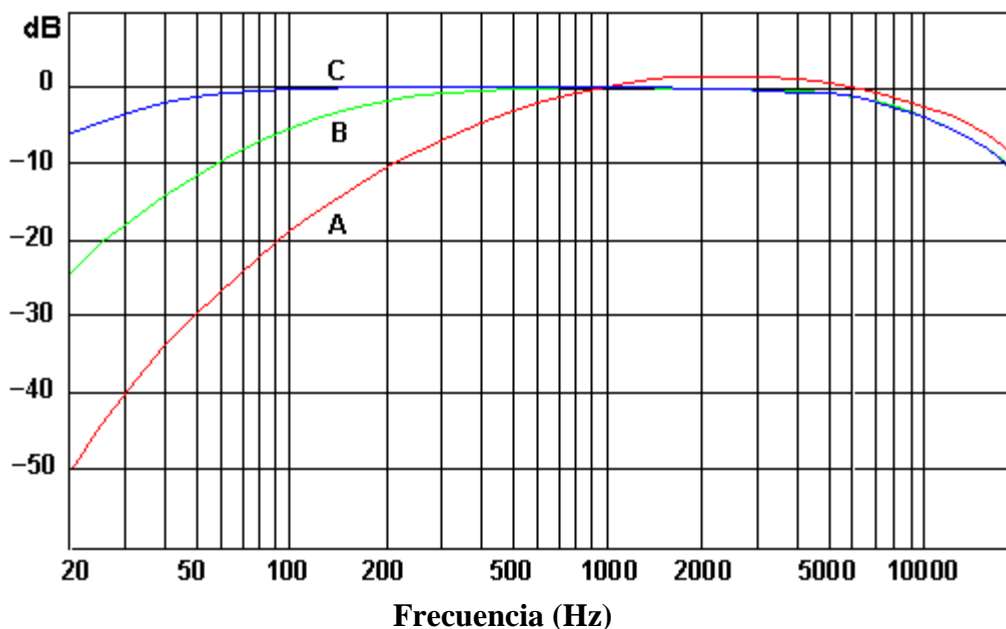
Escalas de ponderación

Como ya se ha indicado, el nivel de presión sonora está lejos de representar con precisión lo que realmente se percibe debido a que la sensibilidad del oído depende fuertemente de la frecuencia. En efecto, como se ha visto en el ejemplo puesto anteriormente, mientras que un sonido de 1 kHz y 0 dB ya es audible, es necesario llegar a los 25 dB para poder escuchar un tono de 100 Hz, y a los 10 dB para percibir sonidos de 10 kHz. Cuando fue descubierta y medida la dependencia de la sensación de sonoridad con la frecuencia (por Fletcher y Munson, en 1933, gráfica 10), se pensó que utilizando una red de filtrado (o ponderación de frecuencia) adecuada sería posible relacionar esa sensación con la medida objetiva. Esta red de filtrado tendría que atenuar las bajas y las muy altas frecuencias, dejando las medias casi inalteradas.

Había, sin embargo, algunas dificultades para implementar tal instrumento o sistema de medición. El más obvio era que, como ya hemos indicado, el oído se comporta de diferente manera con respecto a la dependencia de la frecuencia, para diferentes niveles físicos del sonido. Así, como se puede ver en la gráfica 10, a muy bajos niveles de presión o intensidad sonora, sólo los sonidos de frecuencias medias son audibles (fijémonos en la parte inferior de la gráfica), mientras que a altos niveles (parte superior de la gráfica), todas las frecuencias se escuchan más o menos con la misma sonoridad. Por lo tanto parecía razonable diseñar tres redes de ponderación de frecuencia correspondientes a niveles de alrededor de 40 dB, 70 dB y 100 dB, llamadas también escalas de ponderación A, B y C respectivamente. La red de ponderación A (también denominada a veces red de compensación A) se aplicaría a los sonidos de bajo nivel, la red B a los de nivel medio y la C a los de nivel elevado. Posteriormente, para medir el ruido de aviones se introdujo una cuarta escala denominada escala D.

En la figura 12 se muestran los valores en decibelios que hay que sumar para obtener la respuesta normalizada correspondiente a un sonido de 1000 hz. El resultado de una medición efectuada con la red de ponderación A se expresa en decibeles A, abreviados dBA o algunas veces dB(A), y análogamente para las otras. A pesar de estas recomendaciones, para mayor facilidad en el control de ruido en la industria se emplea la escala A en todos los niveles.

Figura 12



En la tabla 3 se muestran los valores de compensación de la escala A. De acuerdo con esta tabla, para que un sonido de 62,5 Hz produzca el mismo efecto que otro de 80 dB a 1 kHz, su nivel de presión sonora debe ser $(80+26.1)$ dB = 106.1 dB.

Tabla 3

Frecuencia (Hz)	31.25	62.5	125	250	500	1k	2 k	4 k	8 k	10 k
Compensación (dB)	-39.2	-26.1	-16.1	-8.6	-2	0	+1.2	+1.0	-1.1	-6.5

La utilización de la escala de compensación se ilustra en el ejemplo siguiente: si tenemos el espectro de un ruido analizado en función de la frecuencia:

Frecuencia (Hz)	63	125	200	500	1 k	2 k	4 k	8 k
LI (dB)	102.1	98.1	87.6	86.2	76	80.8	75	61

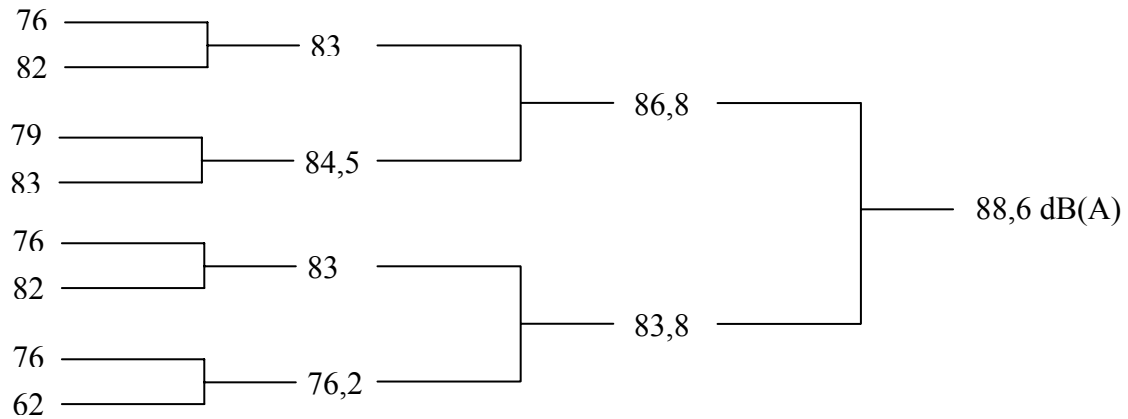
los valores compensados en cada frecuencia, según la escala A, serán los que mostramos en la siguiente tabla:

Frecuencia (Hz)	63	125	200	500	1 k	2 k	4 k	8 k
LI(A) (dBA)	76	82	79	83	76	82	76	62

y, el nivel de presión sonora global compensado, o nivel en dB(A), se obtendrá mediante la adición de los distintos niveles compensados, usando la expresión 56 para cada dos niveles. Por ejemplo, para los dos primeros valores el cálculo sería:

$$LI(\text{suma}) = 10 \log \left(10^{\left(\frac{76}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{82}{10}\right)} \right) = 83 \text{ dB(A)}$$

y sucesivamente, obtendríamos:



También podríamos haber utilizado la expresión 56, con los ocho términos de los niveles medidos:

$$LI(\text{suma}) = 10 \log \left(10^{\left(\frac{76}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{82}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{79}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{83}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{76}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{82}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{76}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{62}{10}\right)} \right) = 88.6 \text{ dB(A)}$$

Por supuesto, para completar una medición era necesaria una suerte de recursividad. Primero había que obtener un valor aproximado para decidir cuál de las tres redes había que utilizar, y luego realizar la medición con la ponderación adecuada.

La segunda dificultad importante proviene del hecho de que las curvas de Fletcher y Munson (al igual que las finalmente normalizadas por la ISO, Organización Internacional de Normalización) son sólo promedios estadísticos, con una desviación estándar (una medida de la dispersión estadística) bastante grande. Esto significa que los valores obtenidos son aplicables a poblaciones no a individuos específicos. Más aún, son aplicables a poblaciones jóvenes y otológicamente normales, ya que las mediciones se realizaron con personas de dichas características.

La tercera dificultad tiene que ver con el hecho de que las curvas de Fletcher y Munson fueron obtenidas para tonos puros, es decir sonidos de una sola frecuencia, los cuales son muy raros en la naturaleza. La mayoría de los sonidos de la vida diaria, tales como el ruido ambiente, la música o la palabra, contienen muchas frecuencias simultáneamente.

Contaminación Acústica (II)

Ruido. Ponderación A y efectos del ruido. El ruido como contaminante. Medida del ruido. Aparatos de medida. Efectos del ruido en el ser humano. Fuentes de ruido. Tipos de ruido. Propagación del ruido ambiental. Índices de ruido. Ruido de tráfico rodado. Ruido de aeronaves.

Ruido

El ruido está constituido por el conjunto de sonidos no deseados, fuertes, desagradables o inesperados. El ruido ambiental se ha desarrollado en las zonas urbanas y es hoy una fuente de preocupación para la población. Se ha calculado que alrededor del 20% de los habitantes de Europa occidental (es decir, 80 millones de personas) están expuestos a niveles de ruido que los expertos consideran inaceptables. Este ruido está causado por el tráfico, y las actividades industriales y recreativas.

Los efectos del ruido pueden variar de un individuo a otro. Sin embargo, el informe de la OMS (Organización Mundial de la Salud) "El ruido en la sociedad - Criterios de salud medioambiental", de 1996, señala que el ruido puede tener una serie de efectos nocivos directos para las personas expuestas al mismo, como alteraciones del sueño, efectos fisiológicos auditivos y no auditivos - básicamente cardiovasculares - o interferencias en la comunicación.

En un principio, la lucha contra el ruido no se consideró una prioridad en materia ambiental, a diferencia, por ejemplo, de la reducción de la contaminación atmosférica. Las consecuencias sobre la población eran menos espectaculares y la degradación de la calidad de vida era aceptada como una consecuencia directa del progreso tecnológico y la urbanización.

Ponderación A y efectos del ruido

Desde luego, las consideraciones hechas sobre la medida del sonido no responden a la pregunta de cuán molesto o perturbador resultará un sonido dado. Es simplemente una escala para la sensación de sonoridad. Varios estudios han enfocado esta cuestión, y existen algunas escalas, como la escala NOY que cuantifica la ruidosidad bajo ciertas suposiciones, y por supuesto, en función del contenido de frecuencias del ruido a evaluar.

Podemos apreciar, por lo tanto, que no hay disponible en la actualidad ninguna escala que sea capaz de dar cuenta con éxito de la molestia que ocasionará un ruido a través de mediciones objetivas, simplemente porque la molestia es una reacción muy personal y dependiente del contexto.

¿Por qué, entonces, ha sobrevivido y se ha vuelto tan popular y difundida la escala de ponderación A? La razón principal es que diversos estudios han mostrado una buena correlación entre el nivel sonoro A y el daño auditivo, así como con la interferencia a la palabra. Sin otra información disponible, el nivel sonoro con ponderación A es la mejor medida disponible para evaluar y justipreciar problemas de ruido y para tomar decisiones en consecuencia. También exhibe una buena correlación, según han revelado diversos estudios, con la disposición de las personas afectadas por contaminación acústica a protestar en distintos niveles.

Es interesante observar que a pesar de que la escala de decibeles A fue originalmente concebida para medir sonidos de bajo nivel, ha demostrado ser más adecuada para medir daño auditivo, resultado de la exposición a ruidos de nivel elevado.

Con respecto a su utilización en cuestiones legales, por ejemplo en la mayoría de las ordenanzas y leyes sobre ruido, es porque proporciona una medida objetiva del sonido de alguna manera relacionada con efectos adversos para la salud y la tranquilidad, así como la interferencia con diversas actividades. No depende del juicio subjetivo de la policía ni del agresor ni del agredido acústicamente. Cualquiera en posesión del instrumental adecuado puede medirlo y decir si excede o no un valor límite de aceptabilidad legal o reglamentario. Esto es importante, aún cuando no sea la panacea. Probablemente en el futuro irán surgiendo mediciones más perfeccionadas y ajustadas a diferentes situaciones.

A continuación se da una relación de niveles sonoros correspondientes a sonidos habituales de nuestro entorno, con el fin de hacernos una idea del orden de magnitud:

- Pájaros trinando: 10 dB
- Claxon automóvil: 90 dB
- Rumor de hojas de árboles: 20 dB
- Claxon autobús: 100 dB
- Zonas residenciales 40 dB
- Interior discotecas: 110 dB
- Conversación normal: 50 dB
- Motocicletas sin silenciador: 115 dB
- Ambiente oficina: 70 dB
- Taladradoras: 120 dB
- Interior fábrica: 80 dB
- Avión sobre la ciudad: 130 dB
- Tráfico rodado: 85 dB
- Umbral de dolor: 140 dB

Algunos valores máximos permitidos de ruidos en edificios públicos son:

- Hospitales: 25 dB
- Bibliotecas y museos: 30 dB
- Cines, teatros y salas de conferencias: 40 dB
- Centros docentes y hoteles: 40 dB
- Oficinas y despachos públicos: 45 dB
- Grandes almacenes, restaurantes y bares: 55 dB

El ruido como contaminante

El ruido es el contaminante más común, y puede definirse como cualquier sonido que sea calificado por quien lo recibe como algo molesto, indeseado, inoportuno o desagradable. Así, lo que es música para una persona, puede ser calificado como ruido para otra. En un sentido más amplio, ruido es todo sonido percibido no deseado por el receptor, y se puede definir al sonido como todo agente físico que estimula el sentido del oído.

El ruido presenta grandes diferencias con respecto a otros contaminantes:

- es el contaminante más barato de producir y necesita muy poca energía para ser emitido.
- es complejo de medir y cuantificar.
- no deja residuos, no tiene un efecto acumulativo en el medio, pero si puede tener un efecto acumulativo en sus efectos en el hombre.
- tiene un radio de acción mucho menor que otros contaminantes, es decir, es localizado.
- no se traslada a través de los sistemas naturales, como el aire contaminado movido por el viento, por ejemplo.

- se percibe sólo por un sentido: el oído, lo cual hace subestimar su efecto. Esto no sucede con el agua, por ejemplo, donde la contaminación se puede percibir por su aspecto, olor y sabor.

Medida del ruido

Los sonidos que tenemos a nuestro alrededor son, como ya se ha indicado anteriormente, sonidos complejos. Esto quiere decir que están formado por un gran número de componentes o sonidos fundamentales de frecuencias definidas. Aunque el margen de frecuencias audibles va desde los 20 Hz hasta los 20 kHz, sabemos que la sensibilidad del oído humano varía mucho con la frecuencia. A veces nos interesa conocer el nivel de intensidad o de presión sonora de una banda de 1 kHz, es decir, el valor de la intensidad o de la presión sonora de hertz en hertz; es lo que se llama un espectro de sonido. Los filtros utilizados para analizar un sonido, eliminan los componentes de este que se encuentren por encima y por debajo de un intervalo de frecuencias dado, de forma que la intensidad o la amplitud de presión que se mide corresponde una banda de frecuencias bien definida, llamada banda de paso y la diferencia entre las frecuencias extremas recibe el nombre de ancho de banda.

A efectos de realizar medidas, es conveniente dividir el margen de frecuencias en intervalos que llamamos de bandas de paso de octava. Se dice que una gama de frecuencias está dividida en bandas de octava si se cumple la relación:

$$f_2/f_1 = 2^N \quad (58)$$

donde f_2 y f_1 son las frecuencias extremas de la banda a considerar. Las divisiones más frecuentes son la de $N=1$, que llamamos división en bandas de una octava y la de $N=1/3$ que recibe el nombre de división en bandas de un tercio de octava.

Las bandas se suelen identificar por su frecuencia central:

$$f_c = \sqrt{f_1 f_2} \quad (59)$$

El ancho de banda se define como la diferencia entre f_2 y f_1 :

$$\text{ancho de banda} = \Delta f = f_2 - f_1 \quad (60)$$

Para el caso de la división en bandas de octava:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = 2 f_1 - f_1 = f_1 = \frac{f_c}{\sqrt{2}} = 0.707 f_c = 70.7 \% f_c \quad (61)$$

y para la de tercio de octava, $f_2 = 2^{1/3} f_1 = 1.26 f_1$ y la anchura de banda será:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = 1.26 f_1 - f_1 = 0.26 f_1 = \frac{0.26 f_c}{\sqrt{1.26}} = 23 \% f_c \quad (62)$$

La elección de un ancho de banda determinado para realizar los análisis depende en gran parte de la composición del ruido. Cuando no existen tonos puros, el análisis en bandas de una octava puede ser suficiente. Como el tiempo necesario para la realización de un análisis aumenta a medida que el ancho de banda disminuye, se emplea siempre el mayor ancho de banda posible con el que se pueda reunir la información necesaria. Para el estudio del control de ruidos en plantas industriales se suele emplear la división en bandas de una octava.

Los filtros empleados para medidas de ruido tienen unas bandas de paso de acuerdo a normas internacionales. Las frecuencias extremas y centrales admitidas internacionalmente para las

bandas de octava y de tercio de octava se dan en la tabla 4. Observemos que, de cada intervalo de la división en bandas de octava, aparecen tres intervalos en la división de tercio de octava.

Tabla 4: Frecuencias extremas y centrales admitidas internacionalmente para las bandas de una octava y de tercio de octava

Banda	Frecuencias extremas (Hz)	Frecuencia central (Hz)
Octava	22.1 – 44.2	31.25
	44.2 – 88.4	62.5
	88.4 – 176.75	125
	176.75 – 355	250
	355 – 707	500
	707 – 1414	1000
	1414 – 2828	2000
	2828 – 5656	4000
	5656 – 11312	8000
Tercio de Octava	<u>22.1</u> – 27.84	24.80
	27.84 – 35.08	31.25
	35.08 – <u>44.20</u>	39.38
	<u>44.20</u> – 55.69	49.61
	55.69 – 70.16	62.50
	70.16 – <u>88.40</u>	78.75

Aparatos de medida

Existen muchos equipos que sirven para medir el ruido. Los laboratorios de acústica y vibraciones suelen contar con los dispositivos adecuados para realizar medidas de gran precisión como son los medidores de nivel sonoro, filtros, registradores gráficos, cintas magnéticas, osciloscopios, ordenadores, etc. Sin embargo, para el control del ruido en la industria (fundamentalmente para hacer pruebas de ruido en equipos) se utilizan los medidores de nivel de sonido o sonómetros.

El sonómetro es un instrumento diseñado para responder al sonido de la misma manera, aproximadamente, que lo hace el oído humano y dar mediciones objetivas y reproducibles del nivel de presión sonora. Existen muchos sistemas de medición sonora disponibles. Aunque son diferentes en el detalle, básicamente cada sistema consiste en un micrófono, una sección de procesamiento y una unidad de lectura.

El micrófono convierte la señal sonora a una señal eléctrica equivalente. La señal eléctrica producida por el micrófono es muy pequeña y debe ser amplificada por un amplificador antes de ser procesada.

Parámetros de medida: Este aspecto determina los tipos de mediciones que pueden hacerse con el instrumento. Los parámetros consideran dos tipos de ponderaciones, aunque no todos los modelos de sonómetros cuentan con el total de ponderaciones existentes. En las tablas 6 y 7, se ofrece una breve caracterización de cada una de ellas.

- Ponderaciones de frecuencia: pueden ser A, B, C, D.
- Ponderaciones de tiempo: pueden ser S (slow), F (fast), I (impulsive) y Peak (pico).

Además de una o más redes de ponderación de frecuencia, los sonómetros usualmente tienen también una red "lineal". Esta no pondera la señal, sino que la deja pasar sin modificarla.

Tabla 6.- Ponderaciones de frecuencia

Tipo	Caracterización
A	Es la red de ponderación más comúnmente utilizada para la valoración de daño auditivo e inteligibilidad de la palabra. Empleada inicialmente para analizar sonidos de baja intensidad, es hoy, prácticamente, la referencia que utilizan las leyes y reglamentos contra el ruido producido a cualquier nivel.
B	Fue creada para modelar la respuesta del oído humano a intensidades medias. Sin embargo, en la actualidad es muy poco empleada. De hecho una gran cantidad de sonómetros ya no la contemplan.
C	En sus orígenes se creó para modelar la respuesta del oído ante sonidos de gran intensidad. En la actualidad, ha ganado prominencia en la evaluación de ruidos en la comunidad, así como en la evaluación de sonidos de baja frecuencia en la banda de frecuencias audibles.
D	Esta red de compensación tiene su utilidad en el análisis del ruido provocado por los aviones.

Tabla 7. - Ponderaciones de tiempo

Tipo	Caracterización
S (Lento)	El instrumento responde lentamente ante los eventos sonoros. El promediado efectivo de tiempo es de aproximadamente un segundo.
F (Rápido)	Brinda una respuesta al estímulo sonoro más rápida. La constante de tiempo es menor (0.125 segundos) y por tanto, puede reflejar fluctuaciones poco sensibles a la ponderación anterior.
I (Impulso)	Tiene una constante de tiempo muy pequeña. Se emplea para juzgar cómo influye, en el oído humano, la intensidad de sonidos de corta duración.
Peak (Pico)	Permite cuantificar niveles picos de presión sonora de extremadamente corta duración (50 microsegundos). Posibilitando la determinación de riesgo de daño auditivo ante los impulsos.

A los sonómetros se les suele incorporar un filtro de frecuencias divididas en bandas de una octava o de tercio de octava, según el grado de precisión que se pretenda alcanzar.

Existen diversos tipos de sonómetros que se diferencian principalmente por el grado de precisión que deben tener en relación a los valores que son capaces de medir. Están clasificados en la normativa internacional como sonómetros tipo 0, 1 y 2 actualmente. El sonómetro tipo 0 se utiliza generalmente en laboratorios especializados y sirve como dispositivo estándar de referencia. El tipo 1, se utiliza tanto en laboratorio como en terreno cuando el ambiente acústico debe ser especificado y/o medido con precisión. El tipo 2, es adecuado para medidas generales en terreno donde no se requiere una gran precisión.

Antes de realizar las medidas se debe calibrar el sonómetro. Suelen llevar incorporado un dispositivo de calibrado interno que es una fuente de ruido patrón que cuando se aplica al micrófono del aparato debe dar la misma lectura de nivel en éste y sirve para ajustar todo el equipo.

Otro aparato que se emplea a efectos de protección personal contra el ruido es el dosímetro, que relacionan el nivel de presión sonora con el tiempo de exposición a dicho nivel y que

proporciona un valor de la dosis de ruido. En la figura 13 se muestran un sonómetro y un dosímetro.

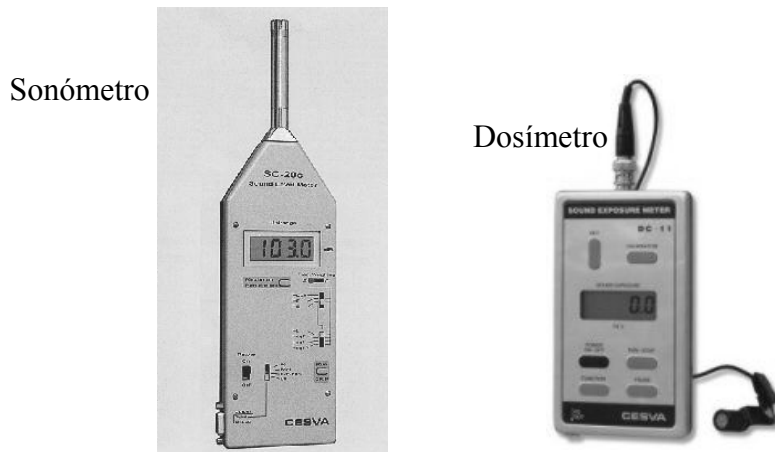


Figura 13 .- Aspecto exterior de un sonómetro y un dosímetro

Algunos sonómetros nos proporcionan el valor de algunos índices estadísticos como los L_1 , L_{10} , L_{50} , L_{90} , $L_{Aeq,T}$ que serán descritos posteriormente.

Efectos del ruido en el ser humano

El ruido aparenta ser el más inofensivo de los agentes contaminantes, puesto que, como se dijo anteriormente, es percibido fundamentalmente por un solo sentido, el oído, y ocasionalmente, en presencia de grandes niveles de presión sonora, por el tacto (percepción de vibraciones), en cambio el resto de los agentes contaminantes son captados por varios sentidos con similar nivel de molestia. Como si esto fuera poco, la percepción y daños de estos contaminantes suele ser instantánea, a diferencia del ruido cuyos efectos son mediatos y acumulativos.

Los efectos de la exposición al ruido pueden ser fisiológicos o psicológicos. Los efectos fisiológicos los clasificaremos, a su vez, en efectos auditivos y no auditivos

1.- Efectos fisiológicos

a.- Efectos fisiológicos auditivos

La exposición a niveles de ruido intenso durante un período de tiempo significativo, da lugar a pérdidas de audición, que si en un principio son recuperables cuando el ruido cesa, con el tiempo pueden llegar a hacerse irreversibles, convirtiéndose en sordera.

A su vez, la exposición a niveles de ruido de mediana intensidad, pero con una prolongación mayor en el tiempo, repercute en forma similar, traducándose ambas situaciones en desplazamientos temporales o permanentes del umbral de audición.

Los métodos de evaluación se realizan a través de análisis audiométricos y/u otoscópicos.

- Desplazamiento temporal del umbral de audición. (TTS: Temporary Threshold Shift). El TTS consiste en una elevación del umbral producida por la presencia de un ruido, existiendo recuperación total al cabo de un período de tiempo, siempre que no se repita la exposición al mismo. Habitualmente se produce durante la primera hora de exposición al ruido,

- Desplazamiento permanente de umbral de audición. (PTS: Permanent Threshold Shift). Es consecuencia del TTS, agravado por el paso del tiempo y la exposición al ruido. Cuando un individuo ha sido sometido a numerosos TTS y durante largos períodos de tiempo (varios años), la recuperación del umbral va siendo cada vez más lenta y parcial, al extremo de tornarse irreversible, situación que denominamos PTS. Se vincula directamente con la presbiacusia, o pérdida de la sensibilidad auditiva debida a los efectos de la edad. La sordera producida es de percepción y simétrica, lo que significa que afecta ambos oídos con idéntica intensidad.

En la figura 14 se muestran los efectos de pérdida de audición correspondientes a la exposición a altos niveles de ruido durante diferentes periodos de tiempo. Como se observa en la gráfica, la pérdida auditiva aumenta mucho con los años de exposición y no es igual para todas las frecuencias, alcanzándose valores mayores para las frecuencias altas.

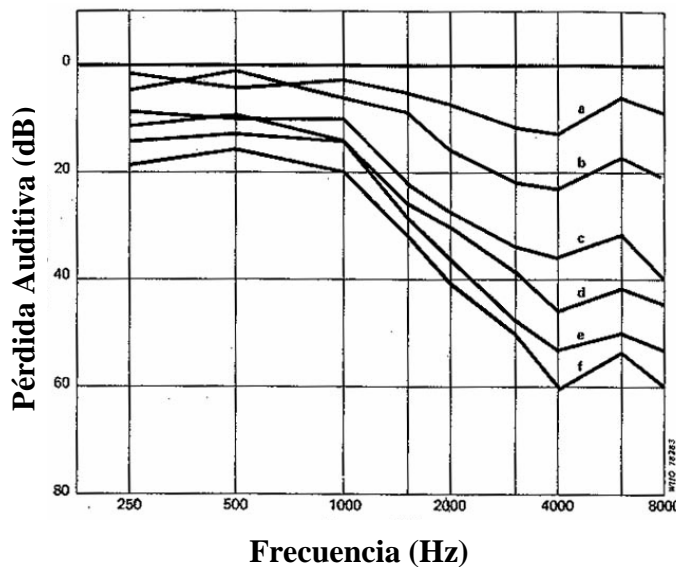


Figura 14

Audiograma promedio (203 muestras) de la pérdida auditiva en función de los años de exposición a altos niveles de ruido.

a < 1 año

b = 1 – 5 años

c = 6 – 10 años

d = 11 – 20 años

e = 21 – 30 años

f > 30 años

Datos: B. Johansson, 1952.

b.- Efectos fisiológicos no auditivos

Además de las afecciones producidas por el ruido al oído, éste actúa negativamente sobre otras partes del organismo, donde se ha comprobado que bastan 50 a 60 dBA para que existan enfermedades asociadas al estímulo sonoro. En presencia de ruido, el organismo adopta una postura defensiva y hace uso de sus mecanismos de protección. Se han podido observar efectos vegetativos como la modificación del ritmo cardíaco y vasoconstricciones del sistema periférico.

Entre los 95 y 105 dBA se producen:

- afecciones en el riego cerebral, debidas a espasmos o dilataciones de los vasos sanguíneos,
- alteraciones en la coordinación del sistema nervioso central;
- alteraciones en el proceso digestivo, dadas por secreciones ácidas del estómago las que acarrearán úlceras duodenales, cólicos y otros trastornos intestinales
- aumento de la tensión muscular y presión arterial
- cambios de pulso en el electroencefalograma
- dilatación de la pupila, alterando la visión nocturna, además de estrechamiento del campo visual.

Las reacciones fisiológicas al ruido no se consideran patológicas si ocurren en ocasiones aisladas, pero exposiciones prolongadas (por ejemplo, el ruido de tráfico urbano) pueden llegar a constituir un grave riesgo para la salud. Se ha comprobado que en los sujetos

expuestos al ruido, se produce un incremento significativo en la concentración de la hormona GH, que es uno de los principales marcadores de estrés. En todo caso, el estrés ambiental no es más que la respuesta defensiva del organismo a estímulos adversos.

2.- Efectos psicológicos

La salud no debe entenderse sólo como ausencia de enfermedad, sino que, salud debe ser sinónimo de bienestar físico y psíquico.

La Psicoacústica es un área que se dedica a investigar sobre las alteraciones psíquicas que provoca el ruido en tareas de vital importancia para el desenvolvimiento humano.

Entre los efectos que provoca el ruido sobre el ser humano citamos:

a. Efectos sobre el sueño.

El ruido puede provocar dificultades para conciliar el sueño y también despertar a quienes están ya dormidos. En numerosas oportunidades hemos escuchado la típica frase de que el sueño es la actividad que copa un tercio de nuestras vidas y este nos permite entre otras cosas descansar, ordenar, y proyectar nuestro consciente, esto es un hecho, así como también está claro que está constituido por a lo menos dos tipos distintos de sueño: El sueño clásico profundo (“No REM” (etapa de sueño profundo), el que a su vez se divide en cuatro fases distintas), y el sueño paradójico (REM).

Se ha comprobado que sonidos del orden de los 60 dBA. reducen la profundidad del sueño.

Dicha disminución se acrecienta a medida que crece la amplitud de la banda de frecuencias, las cuales pueden llegar a despertar al individuo, dependiendo de la fase del sueño en que se encuentre y de la naturaleza del ruido. Los estímulos débiles inesperados también pueden perturbar el sueño.

b. Efectos sobre la conducta.

La aparición súbita de un ruido o la presencia de un agente sonoro molesto para el sujeto, pueden producir alteraciones en su conducta que, al menos momentáneamente, puede hacerse más abúlica, o más agresiva, o mostrar el sujeto un mayor grado de desinterés o irritabilidad.

Las alteraciones conductuales que son pasajeras en la mayor parte de las ocasiones, se producen porque el ruido ha provocado inquietud, inseguridad, o miedo en unos casos, o bien, son causa de un mayor falta de iniciativa en otros.

c. Efectos en la memoria.

En tareas donde se utiliza la memoria, se observa un mejor rendimiento en los sujetos que no han estado sometidos al ruido. Ya que con este ruido crece el nivel de activación del sujeto y esto, que en principio puede ser ventajoso, en relación con el rendimiento en cierto tipo de tareas, resulta que lo que produce es una sobreactivación que conlleva un descenso en el rendimiento.

El ruido hace más lenta la articulación en la tarea de repaso, especialmente con palabras desconocidas o de mayor longitud. Es decir, en condiciones de ruido, el sujeto sufre un costo psicológico para mantener su nivel de rendimiento.

d. Estrés.

Parece probado que el ruido se integra como un elemento estresante fundamental. Y no sólo los ruidos de alta intensidad son los nocivos. Ruidos incluso débiles, pero repetidos

pueden entrañar perturbaciones neurofisiológicas aún más importantes que los ruidos intensos. Es preciso fundamentar más estudios para determinar los riesgos a largo plazo causados por la acción del ruido sobre el sistema nervioso autónomo.

e. Efectos en el embarazo.

Se ha observado que las madres embarazadas que han estado desde el principio en una zona muy ruidosa, tienen niños que no sufren alteraciones, pero si se han instalado en estos lugares después de los 5 meses de gestación (en ese periodo el oído se hace funcional), después del parto los niños no soportan el ruido, lloran cada vez que lo sienten, y al nacer su tamaño es inferior al normal.

f. Efectos sobre los niños.

El ruido es un factor de riesgo para la salud de los niños y repercute negativamente en su aprendizaje. Educados en un ambiente ruidoso se convierten en menos atentos a las señales acústicas y sufren perturbaciones en su capacidad de escuchar y un retraso en el aprendizaje de la lectura. Dificulta la comunicación verbal, favoreciendo el aislamiento y la poca sociabilidad. La exposición al ruido afecta al sistema respiratorio, disminuye la actividad de los órganos digestivos, acelerando el metabolismo y el ritmo respiratorio, provoca trastornos del sueño, irritabilidad, fatiga psíquica, etc.

Fuentes de ruido

Los principales fuentes de ruido son las infraestructuras del transporte, la industria y el medio urbano. Además existen otros focos menos relevantes por su incidencia o su reciente aparición.

La molestia que originan estos focos es función de diferentes factores: tipo de foco, situación nueva o existente, niveles de ruido en el entorno, sensibilidad al ruido de los receptores (usos del suelo), características del ruido, periodo del día en el que se produce (día, noche, ...), días laborables o festivos, etc.

Los focos de ruido ambiental, transporte e instalaciones industriales, son cada vez fuente de mayores quejas, que en principio se deben resolver estableciendo criterios únicos para su valoración, evitando los frecuentes problemas de numerosos valores para caracterizar una misma instalación o foco. A esta problemática se debería añadir la de la calidad acústica en la edificación, que resuelva las crecientes quejas de la población sobre los problemas propios de los edificios (falta de aislamiento, ruido de instalaciones, ...). En la tabla 8 se indican los focos de ruido ambiental más frecuentes.

Tabla 8

Transporte	Carreteras; Ferrocarriles; Aeropuertos
Industria	Plantas industriales; Máquinas
Medio urbano	Tráfico; Talleres; Zonas de ocio nocturno; Obras; Aparcamientos
Otros	Vehículos de motor para deporte/ocio: Karts, motos, motos de agua, ultraligeros, etc. Fiestas y festivales Zonas comerciales

Las primeras medidas comunitarias consistieron en la fijación de los niveles máximos de ruido para determinados tipos de vehículos (coches, aviones) con vistas a la realización del mercado único. A la normativa comunitaria se añadieron también medidas nacionales.

Una evaluación del impacto de las medidas legislativas ha puesto de relieve una notable reducción del ruido emitido por determinados vehículos. Así, el ruido causado por los vehículos particulares se ha reducido en un 85% desde 1970. Sin embargo, el problema del ruido ambiental sigue siendo de actualidad, debido principalmente al aumento del tráfico.

Tipos de ruido

El ruido no es solo ruido. En casa y en el trabajo oímos ruidos, procedentes de sistemas de ventilación o de calefacción, a los cuales difícilmente prestamos atención ya que no tienen características destacables. Esos ruidos se producen de manera continua y no tienen tono, pero si de repente el ventilador, por ejemplo, se parara o empezara a zumbar, el cambio podría llamarnos la atención o incluso molestarnos. Nuestro oído reconoce información en los sonidos que escuchamos. La información que no necesitamos o que no queremos pasa a ser ruido. Las características del ruido que nos hacen atender y prestar atención son tonos o cambios en el nivel sonoro. Cuanto más destacable sea el tono o más abrupto el cambio de nivel sonoro, más perceptible es el ruido. Cuando medimos el ruido, necesitamos saber el tipo de ruido que es con el fin de que podamos seleccionar los parámetros a medir, el equipo a usar y la duración de las medidas. A menudo tenemos que utilizar nuestro oído para captar y subrayar las características molestas del ruido, antes de empezar a tomar medidas y analizarlas.

Algunos tipos de ruidos, los más frecuentes, son los siguientes:

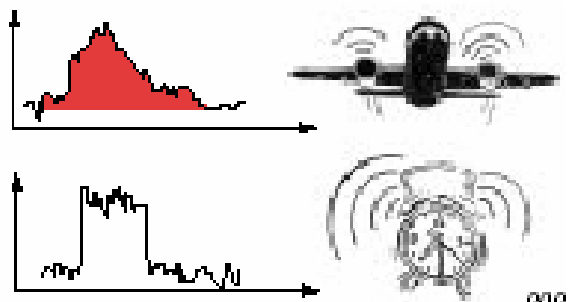
- Ruido continuo

Se produce por maquinaria que opera del mismo modo sin interrupción, por ejemplo, ventiladores, bombas y equipos de proceso. Para determinar el nivel de ruido es suficiente medir durante unos pocos minutos con un equipo manual. Si se escuchan tonos o bajas frecuencias, puede medirse también el espectro de frecuencias para un posterior análisis y documentación del ruido.



- Ruido intermitente

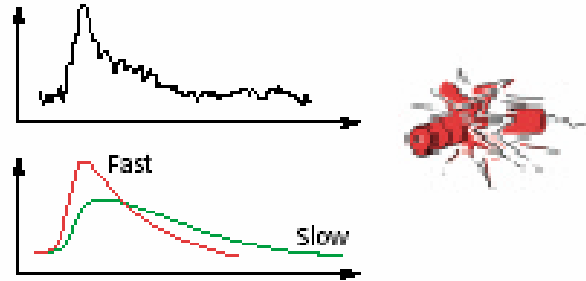
Cuando la maquinaria opera en ciclos, o cuando pasan vehículos aislados o aviones, el nivel de ruido aumenta y disminuye rápidamente. Para cada ciclo de una fuente de ruido de maquinaria, el nivel de ruido puede medirse simplemente como un ruido continuo. Pero también debe anotarse la duración del ciclo. El paso aislado de un vehículo o aeronave se llama suceso. Para medir el ruido de un suceso, se mide el Nivel de Exposición Sonora (SEL = Sound Exposition Level), que combina en un



único descriptor tanto el nivel como la duración. El nivel de presión sonora máximo también puede utilizarse. Puede medirse un número similar de sucesos para establecer una media fiable.

- Ruido impulsivo

El ruido de impactos o explosiones, por ejemplo de un martinete, troqueladora o pistola, es llamado ruido impulsivo. Es breve y abrupto y su efecto sorprendente causa mayor molestia que la esperada de su nivel de presión sonora. Para cuantificar el impulso del ruido, se puede utilizar la diferencia entre un parámetro de respuesta rápida y otro de respuesta lenta midiéndose la tasa de repetición del impulso (número de impulsos por unidad de tiempo).

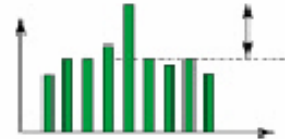


- Tonos en el ruido

Decimos que hay tonos en un ruido cuando una componente de frecuencia (o varias) de su espectro tiene un nivel de presión sonora mayor que el resto. Los tonos molestos suelen generarse de dos maneras:

- La maquinaria con partes rotativas como motores, cajas de cambio, ventiladores y bombas crean tonos. Los desequilibrios o impactos repetidos causan vibraciones que son transmitidas a través de las superficies al aire y se oyen como tonos.
- También generan tonos los flujos pulsantes de líquidos o gases que se producen en procesos de combustión o cambios de flujo.

Los tonos pueden ser identificados subjetivamente, escuchándolos, u objetivamente mediante la medida del espectro y el análisis de las frecuencias que componen el ruido. La audibilidad se calcula entonces comparando el nivel del tono con el nivel de los componentes espectrales circundantes. También debe documentarse la duración del tono.



- Ruidos de baja frecuencia

El ruido de baja frecuencia tiene una energía significativa en el intervalo de frecuencias de 8 a 100 Hz. Este tipo de ruido es típico en grandes motores Diesel de trenes, barcos y plantas de energía y, puesto que es difícil de amortiguar y se extiende con facilidad en todas direcciones puede ser oído a muchos kilómetros. El ruido de baja frecuencia resulta más molesto de lo que cabría esperar de su nivel de presión sonora ponderado A. La diferencia entre el nivel de presión sonora



compensado A, $L_p(A)$, y el nivel de presión sonora compensado C, $L_p(C)$, es un indicador de la presencia o no de un problema de ruido de baja frecuencia. Para calcular la audibilidad de componentes de baja frecuencia en el ruido se mide el espectro y se compara con el umbral auditivo. Los infrasonidos tienen un espectro con componentes de relativa importancia por debajo de 20 Hz. Se perciben, no como un sonido, sino más bien como una presión. Su evaluación es aún experimental y no está reflejada en las normas internacionales.

Propagación del ruido ambiental

¿Cuánto ruido hace un camión de 10 toneladas al circular a 120 km h^{-1} ? La respuesta a esta cuestión es que depende de lo lejos que nos encontremos, de si tenemos o no una barrera acústica entre el camión y nosotros, de la superficie del suelo, del entorno acústico que nos es habitual, etc. Muchos son los factores que afectan al nivel de ruido y los resultados de las medidas pueden variar en decenas de decibelios para una misma fuente de sonido. Para explicar esta variación, necesitamos considerar cómo se emite el ruido desde la fuente, cómo viaja a través del aire y como llega al receptor.

Los factores más importantes que afectan a la propagación del ruido son:

- Distancia desde la fuente
- Tipo de fuente
 - Puntual: Cuando las dimensiones de la fuente son pequeñas comparadas con la distancia al oyente. La energía sonora se propaga de forma esférica como ya se ha indicado por lo que el nivel de presión sonora es el mismo en todos los puntos que se encuentran a la misma distancia de la fuente y disminuye en 6 dB al doblar la distancia. Esto se mantiene así hasta que el efecto del suelo y la atenuación del aire influyen de forma notoria en el nivel.
 - Lineal: Cuando la fuente de sonido es estrecha en una dirección y larga en otra comparada con la distancia al oyente. Puede ser una fuente individual como una cañería llevando un fluido turbulento o puede estar compuesta de muchas fuentes puntuales operando simultáneamente, tal como una sucesión de vehículos en una carretera concurrida. El nivel de sonido se propaga cilíndricamente, por lo que el nivel de presión sonora es el mismo en todos los puntos a la misma distancia de la línea y disminuye en 3 dB al doblar la distancia. Al igual que con la fuente puntual esto se mantiene así hasta que el efecto del suelo y la atenuación del aire influyen de forma notoria en el nivel.
- Atenuación atmosférica

La atenuación del ruido al pasar a través del aire depende de muchos factores, entre ellos:

- Distancia desde la fuente y composición en frecuencias del ruido
- Absorción atmosférica y parámetros ambientales (viento, temperatura y gradiente de temperatura, humedad, precipitación, etc.)

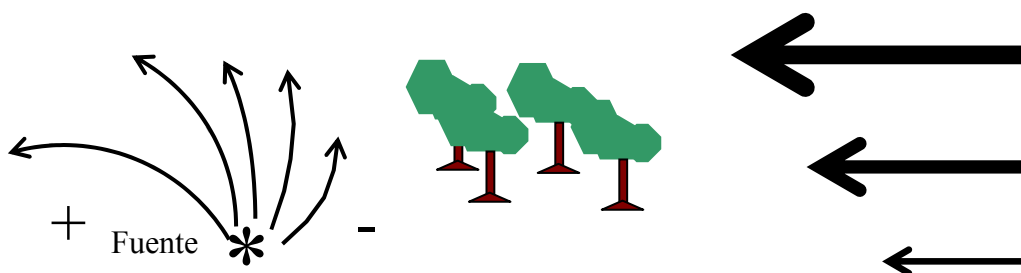


Figura 15

La velocidad del viento aumenta con la altura, lo que desviará la trayectoria del ruido hacia el lado que se encuentra a favor del viento, creando una “sombra en el lado de la fuente que se encuentra en contra del viento, como se ve en la figura 15. Los gradientes de temperatura actúan de forma similar a los de viento.

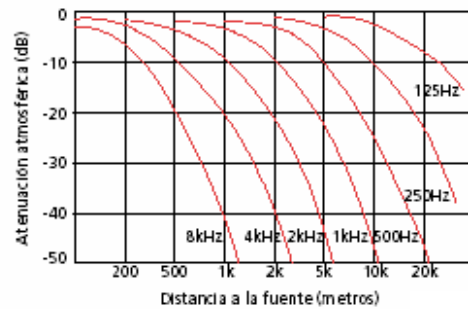


Figura 16

En la figura 16 mostramos la atenuación debida a la atmósfera para sonidos de diferente frecuencia en función de la distancia a la fuente. En ella se puede ver que la absorción atmosférica no atenúa bien las bajas frecuencias.

- Obstáculos (barreras y edificios)

La reducción del ruido causado por una barrera depende de dos factores:

- La diferencia de la trayectoria de la onda sonora que viaja por encima de la barrera comparado con la transmisión directa al receptor ($A + B - e$ en la figura 16).
- El contenido frecuencial del ruido

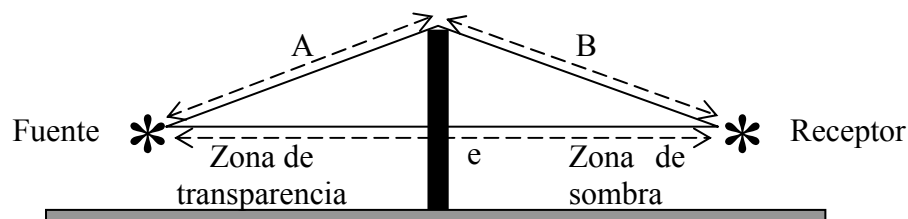


Figura 17.- Geometría del camino de propagación del sonido sobre una barrera rígida

En los apuntes de toda la asignatura (Prof. D. Segarra), entre las páginas T3-13 y T3-17 se muestran los gráficos y tabla correspondientes a la atenuación que produce una barrera infinita en función del llamado número de Fresnel, N , que se define como:

$$N = \pm \frac{2}{\lambda} (A + B - e) \quad (63)$$

donde $(A + B)$ es la distancia mínima que tiene que recorrer la onda sonora desde la fuente al receptor en metros, e es la distancia entre la fuente y el receptor en metros y λ es la longitud de onda del sonido en metros (figura 17). El signo menos corresponde a la situación en que el receptor está situado en la zona de transparencia (puede ver la fuente) y el signo mas a la zona de sombra (detrás de la barrera). Como se observa en la figura de la página T3-17b prácticamente la atenuación máxima que se puede alcanzar es de unos 24 dB.

Ensayos experimentales muestran que las bajas frecuencias son difíciles de combatir usando barreras y que una barrera es mucho más efectiva si se coloca cerca de la fuente o del receptor

En cuanto a la atenuación del sonido en zonas urbanas, el factor más importante es la presencia de edificios.

Hay que tener en cuenta que la presencia de edificios a ambos lados de la fuente sonora produce el denominado “efecto cañón”, que incrementa hasta en 10 dB(A) el nivel

sonoro. También se produce el efecto “fachada”, que puede aumentar el nivel sonoro en unos 3 dB(A) en puntos próximos a las fachadas de los edificios, debida a la reflexión del sonido en ellas, como se comenta más adelante.

- Absorción del terreno

El sonido reflejado por el terreno interfiere con el sonido escuchado directamente.

El efecto del suelo es diferente según se trate de superficies duras (hormigón o cemento), blandas (césped, árboles o vegetación) o mixtas. La atenuación del terreno se calcula en bandas de frecuencia para tener en cuenta el contenido frecuencial de la fuente de ruido y el tipo de terreno entre la fuente y el receptor. La precipitación puede afectar la atenuación del terreno. La nieve, por ejemplo, puede dar una atenuación considerable y, además, puede causar gradientes de temperatura positivos altos que afecten a la recepción del sonido. Las normas, habitualmente, desaconsejan que se mida en estas condiciones

- Reflexiones

Cuando las ondas de sonido impactan sobre una superficie, parte de su energía se transmite a su través, parte se refleja en ella y parte es absorbida por ella. Si la absorción y la transmisión son bajas, como sucede generalmente en el caso de los edificios, la mayoría de la energía sonora se refleja y se dice que la superficie es muy reflectante. El nivel de presión sonora cerca de la superficie se debe a la emisión directa de la fuente más el sonido que llega procedente de una o varias reflexiones. Típicamente, a 0.5 m de una pared lisa el nivel de sonido es 3 dB mayor que si no hubiera pared (efecto “fachada”).

Índices de ruido

La mayor parte de los sonidos varían a lo largo del tiempo, pudiendo fluctuar en una escala muy pequeña (si medimos a una cierta distancia de una autopista) o en una escala muy amplia (si medimos cerca de un aeropuerto). Todos estos tipos de variación sonora deberían ser descritos mediante una única unidad. La descripción de todos los diferentes ruidos está basada en la hipótesis que a dosis de ruido iguales (lo que significa energía acústica multiplicada por el tiempo de exposición) resultan efectos sonoros iguales. Este método de obtención de valores a lo largo del tiempo es el llamado “nivel sonoro continuo equivalente ponderado A”, L_{Aeq} también llamado nivel equivalente A.

El nivel sonoro continuo equivalente se define como la media logarítmica del nivel sonoro L_i :

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[\frac{\sum_i T_i 10^{L_i(A)/10}}{T} \right] \quad (64)$$

donde $L_i(A)$ es el nivel sonoro, ponderado con la escala A, correspondiente al intervalo de tiempo de medida T_i y T es el tiempo total de medida ($T = \sum_{i=1}^n T_i$).

El nivel sonoro continuo equivalente se conoce en todo el mundo como el parámetro promedio esencial. El L_{Aeq} es el nivel que, de haber sido constante durante el periodo de medición, representaría la misma cantidad de energía presente en el nivel de presión sonora fluctuante medido. El L_{Aeq} se mide directamente con un sonómetro integrador, o se calcula a través de la expresión (55), midiendo los valores de $L_i(A)$ en los periodos T_i con un sonómetro sencillo. Se utiliza en la mayoría de las legislaciones tanto de los Estados

miembros de la comunidad europea como a nivel internacional. Fue adoptado por la ISO para la medida de la exposición al ruido ambiental y los riesgos de lesión auditiva.

Para introducir en esta medida la diferencia en el grado de molestia que produce un mismo nivel sonoro durante el día y la noche, se utiliza también el índice llamado nivel equivalente día – noche, L_{dn} , dividiendo las 24 horas de una jornada en dos periodos de 15 y 9 horas respectivamente, correspondientes a los periodos diurno y nocturno y penalizando los ruidos ocasionados durante la noche con un incremento de 10 dB. Así:

$$L_{dn} = 10 \log \frac{1}{24} \left(15 \times 10^{\left(\frac{L_d}{10}\right)} + 9 \times 10^{\left(\frac{L_n+10}{10}\right)} \right) \quad (65)$$

donde L_d y L_n corresponden a los niveles equivalentes extendidos a periodos de 15 y 9 horas respectivamente. Se considera periodo diurno el comprendido entre las 7 y las 22 horas y periodo nocturno el comprendido entre las 22 y las 7 horas.

También se utiliza el nivel equivalente día, tarde, noche, L_{den} (del término inglés day-evening-night level), recomendado por la Comisión Europea como indicador para los informes sobre ruido en toda la Unión Europea

$$L_{dn} = 10 \log \frac{1}{24} \left(15 \times 10^{\left(\frac{L_d}{10}\right)} + 9 \times 10^{\left(\frac{L_n+10}{10}\right)} \right) \quad (66)$$

El L_{Aeq} no es una medida de la molestia que representa un ruido, aunque se correlaciona bien con la molestia. Evidentemente, un nivel de ruido aceptable un miércoles por la tarde podría ser muy molesto un domingo por la mañana temprano.

Pero continúan existiendo problemas en describir mediante el L_{Aeq} los sonidos con fluctuaciones muy rápidas y los casos de sonidos poco corrientes. Para superar estos problemas, se utilizan diversos indicadores como son, por ejemplo:

- Nivel máximo de presión acústica $L_{p_{m\acute{a}x}}$,
- Niveles de ruido estadísticos $L_{A,n}$ que indica el nivel sonoro que se sobrepasa el n% del tiempo. Por ejemplo, $L_{A90} = 45$ dB(A) significa que durante el 90% del tiempo los niveles son superiores a 45 dB(A). El nivel L_{A90} de un ruido es conocido como el ruido de fondo.
- Índice de ruido
- El número NNI (que tiene en cuenta también el número de sucesos de ruido),
- Nivel de evaluación, L_r :

La molestia debida a una fuente de ruido determinada se percibe de forma diferente según la persona y también depende de otros muchos factores no acústicos sino más bien psicológicos (como la importancia de la fuente de ruido respecto a la economía del oyente, la opinión que tenga de la fuente, etc.). Durante muchos años se ha intentado cuantificar esto para que resulte posible una evaluación objetiva de la molestia que ocasiona un ruido y aplicar límites de ruido aceptables. Cuando un gran número de personas están involucradas, las reacciones tienden a distribuirse alrededor de un promedio y el parámetro L_r ha sido desarrollado en un intento de poner un valor numérico a un ruido, con el objeto de cuantificar su molestia en relación a la población en general.

El nivel de evaluación, L_r , se define en la norma ISO 1996-2. Se trata básicamente de una medida de la exposición al ruido corregida por factores conocidos que incrementan la molestia. Se utiliza para comparar niveles medidos con límites de ruido que varían, generalmente dependiendo del uso de la propiedad que esté siendo investigada. El parámetro básico es el nivel sonoro continuo equivalente ponderado A, L_{Aeq} .

La fórmula general para el nivel de evaluación es:

$$L_r = L_{Aeq} + k_I + k_T + k_R + k_S \quad (67)$$

donde las "penalizaciones" añadidas al L_{Aeq} , son:

k_I es una penalización por impulsos en el ruido

k_T es una penalización por tono y contenido de información

k_R es una penalización por la hora del día

k_S es una penalización (positiva o negativa) para ciertas fuentes y situaciones

El sentido de aplicar estas penalizaciones se puede observar en la siguiente situación. Si el sonido está compuesto de una única tonalidad o de tonalidades con frecuencias muy bajas, podría ser muy molesto. Por consiguiente, se añaden "penalizaciones" al L_{Aeq} con objeto de tener en cuenta estas molestias.

Las normas internacionales describen cómo determinar el nivel de evaluación, L_r , pero no imponen límites legales. Los límites están regulados individualmente por el país o autoridad local. Las diferencias en el estilo de vida, el clima (actividades al aire libre, ventanas abiertas o cerradas, etc.) y el diseño de los edificios hacen que la armonización internacional de los límites de ruido sea difícil.

Ruido de tráfico rodado

El ruido del tráfico rodado es el producido por los vehículos en circulación y es el resultado de la superposición de diversos ruidos producidos por el motor, la transmisión, los neumáticos, etc. En la tabla 8 se dan, como ejemplo, los niveles sonoros producidos por diversos tipos de vehículos a 7.5 m del eje del vehículo y a 1.2 m del suelo.

Tabla 8

Tipo de vehículo	Plena aceleración dB(A)	Velocidad constante dB(A)
Ciclomotores	76	77
Vehículos utilitarios	83	73
Turismos particulares	83	71
Vehículos transporte público	90	83
Vehículos utilitarios pesados	90	81

El ruido de tráfico rodado es la fuente de ruido más importante en todos los países y la causa más frecuente de molestias e interferencias. Por esta razón, las medidas de reducción del ruido del tráfico tienen prioridad absoluta. El L_{Aeq} es el índice de ruido preferido por casi todos los países, pero también se utilizan el nivel de evaluación, L_r y los niveles percentiles L_{10} y L_{50} .

Para tráfico denso, se asume que el L_{10} es unos 3 dB superior al L_{Aeq} y que el L_{50} es entre 1 y 2 dB inferior. La evaluación se lleva a cabo usando diferentes intervalos de tiempo de referencia según el país. Estos intervalos varían desde un único periodo de 24 h hasta tres intervalos distintos para día, tarde y noche. Generalmente, los límites nocturnos son los más difíciles de cumplir. La tabla 9 muestra los límites de planificación de nuevas carreteras en distintos países. Los límites están a menudo por encima de los 50 – 55 dB(A) recomendados por la OMS (Organización Mundial de la Salud) por lo que la expansión de áreas acústicamente contaminadas o “áreas grises” es inevitable en todas partes.

Tabla 9

Límites para ruido de tráfico rodado				
País	Índice	Límite día	Límite tarde	Límite noche
Australia	$L_{10, 18 h}$	60		55
Austria	L_{Aeq}	50 - 55		40 - 45
Canadá	L_{Aeq}	55		50
Dinamarca	$L_{Aeq, 24 h}$	55		
Francia	L_{Aeq}	60 - 65		55 - 57
Alemania	L_r	50 - 55		40 - 45
Holanda	L_{Aeq}	50	45	40
España	L_{Aeq}	60		50
Suecia	$L_{Aeq, 24 h}$	55		
Suiza	L_r	55		45
Reino Unido	L_{Aeq}	55		42

Ruido de Aeronaves

El ruido de los aviones es característico no sólo por su enorme intensidad sino porque se presenta de forma súbita e intermitente con una corta duración (unos 45 segundos) a lo largo del día o la noche mezclándose con períodos de silencio más o menos largos (generalmente el tráfico aéreo es distanciado por los controladores al menos un par de minutos). El ruido del tráfico rodado en una ciudad es más continuo y presenta menor intensidad y es menos nocivo porque nuestro organismo está más adaptado a él mediante un mecanismo de reducción de ganancia en función precisamente de su continuidad. Esto hace que lejos de constituir un beneficio fisiológico el distanciamiento entre los “picos de ruido de los aviones” favorece el “estrés” y las reacciones adversas al no activar el mecanismo de defensa de reducción de ganancia (bajada del nivel de ruido) del que nos ha dotado la naturaleza.

Por otra parte los aviones, además, constituyen una fuente muy localizada de sonido en contraposición al tráfico rodado. Esto hace que las ondas sonoras lleguen en fase al terreno, por lo que los edificios y el suelo vibran y actúan como fuente secundaria de sonido, lo que hace más difícil el aislamiento acústico del interior de un edificio expuesto al ruido de aviones que en el caso de ruidos deslocalizados del tráfico de una ciudad. Además, al alejarse el avión se producen interferencias entre la onda directa emitida por el avión y la reflejada por el terreno.

Cuando estas interferencias son constructivas se producen intensificaciones de ruido al alejarse el avión (algo similar ocurre con el "retumbar" de los truenos). Además, al ser el avión una fuente de ruido en movimiento (a unos 400 km/h en nuestros alrededores) se produce un desplazamiento de las frecuencias de recepción del ruido desde las altas frecuencias cuando se acerca hacia bajas frecuencias cuando el avión se aleja (efecto Doppler) constituyéndose, por tanto, en una de las fuentes de ruido de más variadas frecuencias.

Estas características del ruido generado por los aviones hacen que no sean adecuados los indicadores normales de ruido (promedios) que se utilizan para ruidos continuos. En la Propuesta de directiva del Parlamento Europeo y del Consejo sobre evaluación y gestión del ruido ambiental de la Comunidad Europea se dice literalmente en el apartado 3 sobre "Indicadores de ruido adicionales para casos especiales":

"Además de L_{DEN} y L_{NIGHT} , puede resultar conveniente utilizar indicadores de ruido especiales con los valores límite correspondientes, por ejemplo cuando **la fuente emisora de ruido considerada sólo está activa durante una pequeña fracción de tiempo (por ejemplo, menos del 20% del tiempo durante todos los períodos diurnos, vespertinos o nocturnos de un año)"**

La herramienta más importante para el control del ruido en aeropuertos es la zonificación de los usos del suelo, la planificación y programas de aislamiento del ruido. El ruido procedente de aeronaves comerciales sólo es un problema alrededor de los aeropuertos donde convergen la baja altitud y los motores a alta potencia de los aviones en los despegues o aterrizajes. El aumento del tráfico aéreo y el crecimiento de la ciudad, que siempre acaba envolviendo el aeropuerto, exacerba los problemas de ruido. La reducción del ruido que hacen los aviones y las restricciones tanto en el tráfico como en las trayectorias de vuelo pueden aliviarlos. Como último recurso, las viviendas existentes pueden ser protegidas contra el ruido mejorando el aislamiento de ventanas y tejados.

Legislación

Unión Europea

La Comisión Europea presentó, en julio del 2000, una Propuesta de directiva sobre la evaluación y gestión del ruido ambiental.

La Propuesta introduce medidas para clasificar y comprender los problemas causados por ruido ambiental como un paso necesario para preparar medidas concretas para reducir la contaminación acústica.

Los objetivos de la Propuesta de directiva son los siguientes:

- Armonizar los indicadores de ruido y los métodos de evaluación del ruido ambiental en la Unión Europea.
- Exponer los datos obtenidos con estos indicadores y métodos de evaluación en forma de mapa de ruido.
- Hacer pública toda esta información. Los datos sobre la exposición servirán de base para los planes de acción a escala local, y también para determinar los objetivos de mejora en la Unión Europea y confeccionar una estrategia y medidas comunitarias.

Estado español

El 17 de noviembre de 2003 se publicó la Ley 37/2003 del ruido, que se adjunta a estos apuntes en formato pdf. Para consultar la legislación vigente tanto en la Comunidad Europea como en España y la normativa desarrollada por las comunidades autónomas, buscar en la dirección de internet <http://www>