

Módulo I: Contaminación Ambiental

CONTAMINACIÓN POR RUIDO

VICENTE MESTRE SANCHO

SUMARIO

1. FÍSICA DEL SONIDO.....	1
1.1 Naturaleza del sonido.....	1
1.2 Generación del sonido.....	3
1.3 Potencia, intensidad y presión sonora.....	3
1.4 El decibel.....	4
1.5 Niveles de intensidad, potencia y presión sonora.....	5
1.6 Suma de niveles.....	7
1.7 Análisis espectral. Bandas de frecuencia.....	7
1.8 Curvas de audición.....	7
1.9 Curvas de ponderación.....	7
1.10 Variación del ruido con el tiempo. Nivel continuo equivalente.....	7
2. PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN CAMPO LIBRE.....	21
2.1 Propagación del sonido.....	7
2.2 Atenuación del sonido en su propagación.....	7
3. EFECTOS DEL RUIDO.....	33
3.1 Introducción.....	7
3.2 Efectos fisiológicos.....	7
3.3 Interferencia con la comunicación hablada.....	7
3.4 Interferencia con el descanso y el sueño.....	7
3.5 Efectos sobre el trabajo.....	7
3.6 Molestia.....	7
3.7 Efectos directos sobre la salud.....	7
3.8 Respuesta de la comunidad al ruido ambiental.....	7
4. CONTROL DE RUIDO EN LA INDUSTRIA.....	57
4.1 Introducción.....	7
4.2 Acciones de control.....	7
4.3 Desplazamiento de la fuente sonora.....	7

4.4	Sustitución de las fuentes sonoras	7
4.5	Barreras acústicas	7
4.6	Absorción acústica. condicionamiento acústico.....	7
4.7	Aislamiento acústico	7
4.8	Atenuadores	7
4.9	Protección Personal.....	7
5.	TRAFICO RODADO	93
5.1	Ruido de tráfico.....	7
5.2	Índices de medida. El ruido de tráfico	7
5.3	Fuentes de ruido en los diferentes tipos de vehículos	7
5.4	Ruido de tráfico en vías de circulación rápida	7
5.5	Barreras acústicas naturales y artificiales.....	7
5.6	Tráfico urbano.....	7
5.7	Predicción de los niveles de ruido generados por el tráfico rodado.....	7
6.	FERROCARRILES	116
6.1	Introducción	7
6.2	Fuentes de ruido en ferrocarriles	7
6.3	Descripción del ruido de trenes	7
6.4	Ruido de trenes de superficie	7
6.5	Métodos de predicción.....	7
6.6	Trenes elevados	7
7.	TRÁFICO AÉREO.....	127
7.1	Introducción	7
7.2	Fuentes de ruido en las aeronaves.....	7
7.3	Magnitudes de medida del ruido de aeronaves	7
7.4	Despegues y aterrizajes: Huellas sonoras.....	7
7.5	Índices de exposición al ruido de aeronaves	7
7.6	Niveles de ruido generados por las aeronaves.....	7
7.7	Predicción del ruido generado por el sobrevuelo de las aeronaves.....	7

1 FÍSICA DEL SONIDO

1.1 NATURALEZA DEL SONIDO

Desde el punto de vista de la Física, el sonido es una perturbación que se propaga a través de un medio elástico con una velocidad que es característica del medio. En el aire esta perturbación se manifiesta de forma de pequeñas fluctuaciones periódicas de presión. Igualmente el sonido puede definirse como la sensación auditiva que genera la citada perturbación física.

Las variaciones o fluctuaciones de presión capaces de ser detectadas por el oído humano son pequeñísimas, así 0,1 milibares generan un sonido muy intenso (la presión atmosférica es aproximadamente igual a 1.000 milibares).

Por otra parte la energía necesaria para mantener estas variaciones de presión es muy pequeña: una persona gritando emite una potencia acústica de 0,001 watt. Para muchas fuentes sonoras industriales, se estima que la relación entre la potencia sonora radiada y la potencia mecánica está comprendida entre 10^{-4} y 10^{-5} .

Las mencionadas fluctuaciones u ondas de presión se propagan en el aire de forma rectilínea y con una velocidad c dada por la ecuación:

$$c = \left[\delta \frac{P}{\rho} \right]^{1/2} \quad (1.1)$$

donde: δ es la constante adiabática de los gases y cuyo valor es 1.4

P es la presión del aire

ρ es la densidad del aire

En condiciones normales $P = 10^5 \text{ Nm/m}^2$ y $\rho = 1.18 \text{ Kg/m}^2$ consecuentemente, la velocidad del sonido es 344 m/s.

Si se supone que la relación entre la presión y la densidad depende solo de la Temperatura, T , la ecuación anterior puede escribirse según:

$$c = 344 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} \quad (1.2)$$

Esta última ecuación puede escribirse de forma aproximada en función de la temperatura del aire en grados centígrados (c) como:

$$c=331.6+0.6t \quad (1.3)$$

Como todo movimiento ondulatorio las magnitudes que caracterizan a un sonido puro son:

- La amplitud de la fluctuación, que determina la energía del sonido
- El período de la fluctuación o tiempo que tarda en pasar dos veces por la misma posición. Sin embargo se utiliza la inversa del período, esto es, el número de veces por segundo que se repite la fluctuación, que determina la frecuencia del sonido

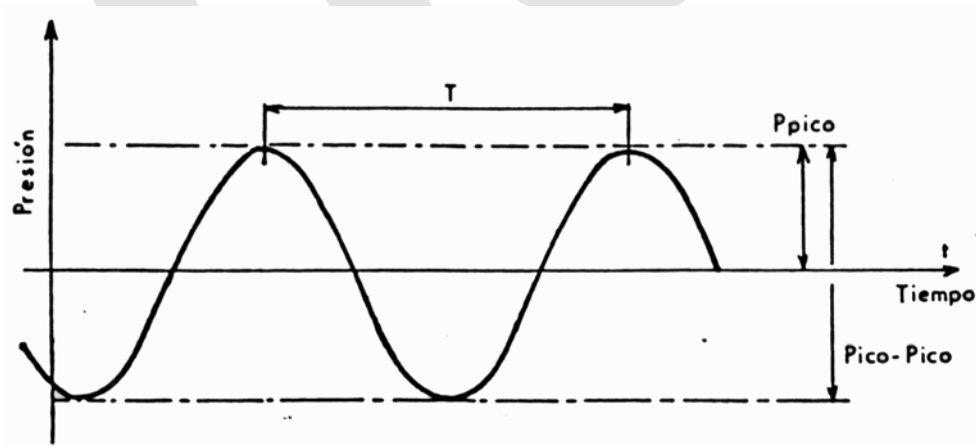
Para que el oído pueda detectar las ondas sonoras, la frecuencia de éstas deberá estar comprendida aproximadamente entre 16 Hz y 20.000 Hz.

Entre la frecuencia f , y la velocidad de propagación de la onda existe la relación:

$$c=\lambda f \quad (1.4)$$

donde λ es la longitud de onda o el espacio recorrido por la onda en un ciclo completo (Figura 1.1).

FIGURA 1.1. REPRESENTACIÓN DE UNA ONDA SINUSOIDAL



1.2 GENERACIÓN DEL SONIDO

Cualquier superficie sólida que vibre genera en el medio ambiente en que se encuentra una perturbación de características análogas. Esta será la fuente más simple de sonido, sin embargo éste podrá también ser generado por cualquier proceso que implique fluctuaciones periódicas del medio, tal es el caso de las aspas de un ventilador, instrumentos musicales, etc.

Este es el caso del diafragma de un altavoz, la superficie de cualquier máquina rotatoria, un violín, etc. En otras situaciones tales como una explosión, un petardo, etc., estas fluctuaciones son muy difíciles de visualizar.

El sonido una vez generado se propaga en el espacio en todas direcciones pudiendo encontrarse en su camino con obstáculos, cumpliéndose:

- Si las dimensiones del obstáculo son menores que la longitud de onda (bajas frecuencias), el sonido no es afectado en su propagación.
- Si las dimensiones del obstáculo son mayores que la longitud de onda (altas frecuencias), el sonido sufre los fenómenos de difracción y de reflexión.

1.3 POTENCIA, INTENSIDAD Y PRESIÓN SONORA

Para que una onda sonora pueda propagarse por un medio elástico será necesaria una cierta energía y físicamente esto indica que se tendrá que realizar un trabajo en la unidad de tiempo, es decir que la fuente generadora de onda tendrá una cierta potencia sonora.

Esta potencia sonora es una característica constante de las fuentes; así siempre que esta trabaje con las mismas características, su potencia sonora será la misma.

Se llama intensidad acústica a la energía radiada por una fuente en la unidad de tiempo que atraviesa la unidad de superficie. Es decir, que la intensidad acústica I_a , la potencia acústica W_a y la superficie S están relacionadas por:

$$I_a = \frac{W_a}{S} \quad (1.4)$$

Si se supone una fuente que radia en todas direcciones (radiación esférica), la intensidad sonora a una distancia r de la fuente será:

$$I_a = \frac{W_a}{4\pi r^2} \quad (1.6)$$

es decir, la intensidad sonora varía con la distancia (r) a la fuente según $1/r^2$, ya que la potencia de la fuente permanece constante.

La intensidad sonora está relacionada con el cuadrado de la presión acústica P_a . En ondas planas, es decir aquellas cuya dirección de propagación es constante en cualquier punto del espacio, esta relación es:

$$I_a = \frac{p_a^2}{\rho c} \quad (1.7)$$

donde: ρ es la densidad del aire y c la velocidad del sonido.

Esta última relación es también válida para las ondas esféricas en puntos muy alejados de la fuente, es decir cuando el radio de curvatura sea grande.

1.4 EL DECIBEL

El oído humano es capaz de detectar intensidades sonoras que varían en un amplio margen. Así entre el umbral de audición (mínima señal capaz de ser detectada) y el máximo de audición (o umbral de dolor) existe una relación en términos de intensidad de 10^{-4} .

Con el fin de no utilizar cifras tan elevadas y debido a que en el ser humano la sensación producida por un estímulo depende del estado previo de excitación, se utilizaron unidades logarítmicas o decibeles.

Se define el decibel como diez veces el logaritmo decimal de la relación de dos magnitudes, es decir:

$$N = 10 \log \frac{M_1}{M_2} \text{ dB} \quad (1.8)$$

donde: N es el nivel en decibeles.

M_1 y M_2 son dos magnitudes homogéneas.

Cabe indicar que:

- El concepto de decibelio carece de significado físico a menos que se indique la magnitud de referencia (voltaje, presión, potencia, etc.).

- El concepto de decibelio va asociado al concepto de nivel, relativo a un valor de referencia.

1.5 NIVELES DE INTENSIDAD, POTENCIA Y PRESIÓN SONORA

- Se define el Nivel de Intensidad Sonora como diez veces el logaritmo decimal de la relación de dos intensidades acústicas.

$$NIS = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB} \quad (1.9)$$

donde I_0 es la intensidad de referencia y cuyo valor es 10^{-12} wattios/m².

- Se define el Nivel de Potencia Sonora como diez veces el logaritmo decimal de la relación de dos potencias acústicas, es decir:

$$NWS = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ dB} \quad (1.10)$$

donde W_0 es la potencia sonora de referencia y cuyo valor es 10^{-12} wattios.

- Se define el Nivel de Presión Sonora como diez veces el logaritmo decimal de la relación de dos presiones acústicas al cuadrado, es decir:

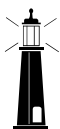
$$NPS = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} \text{ dB} \quad (1.11)$$

donde P_0 es la presión sonora de referencia y cuyo valor es 2×10^{-5} Newton/m².

Todos estos valores se muestran a modo de resumen en la Tabla 1.1

TABLA 1.1 NIVELES ACÚSTICOS Y VALORES NORMALIZADOS DE REFERENCIA

NOMBRE	DEFINICIÓN	REFERENCIA
Nivel de presión sonora	$NPS = 10 \log (P/P_0)^2$	$P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$
Nivel de potencia	$NWS = 10 \log W/W_0$	$W_0 = 10^{-12} \text{ watt}$
Nivel de intensidad	$NIS = 10 \log I/I_0$	$I_0 = 10^{-12} \text{ watt/m}^2$



En la Tabla 1.2 se presentan las relaciones entre las potencias de una fuente, sus niveles de presión y las sensaciones que experimenta el oído. Hay que

señalar que variaciones de 3 dB en el nivel de presión sonora, son las mínimas fluctuaciones detectables por el oído medio.

TABLA 1.2 ESCALA LINEAL, LOGARÍTMICA Y SUBJETIVA

POTENCIA DE LA FUENTE	NIVEL DE PRESIÓN SONORA EN dB	AUMENTO DE RUIDOSIDAD
1	X	Referencia
2	X + 3	Apenas percep.
3	X + 5	Aumento “
5	X + 7	50% más ruidoso
10	X + 10	Dos veces “
40	X + 16	Tres veces “
100	X + 20	Cuatro veces “

En la Tabla 1.3 se muestran los niveles de presión sonora medios existentes en diferentes ambientes, y en la Tabla 1.4 se indican los niveles de potencia sonora emitidos por algunas fuentes.

**TABLA 1.3
NIVELES DE PRESIÓN SONORA TÍPICOS EXISTENTES EN DIVERSOS AMBIENTES**

PRESIÓN SONORA (NEWTON/M ²)	NIVEL DE PRESIÓN (dB)	AMBIENTE TÍPICO	SENSACIÓN SUBJETIVA
200	140	Despegue de avión militar (a 30 m)	Intolerable
63	130	Desbarbado neumático (posición operario)	
20	120	Sala de máquinas de un buque	
6,3	110	Prensa automática (posición operario)	Muy ruidoso
2	100	Sala de imprenta	
$6,3 \cdot 10^{-1}$	90	Camión pesado (a 6 m)	Ruidoso
$2 \cdot 10^{-1}$	80	Calle con mucho tráfico	
$6,3 \cdot 10^{-2}$	70	Aparato de radio a elevado volumen	
$2 \cdot 10^{-2}$	60	Restaurante	Poco ruidoso
$6,3 \cdot 10^{-3}$	50	Conversación normal (a 1 m)	
$2 \cdot 10^{-3}$	40	Área residencia durante la noche	
$6,3 \cdot 10^{-4}$	30		Silencioso
$2 \cdot 10^{-4}$	20	Nivel de fondo en estudios de TV	

$6,3 \cdot 10^{-5}$	10	
$2 \cdot 10^{-5}$	0	Umbral de audición

TABLA 1.4 NIVELES DE POTENCIA EMITIDOS POR DIVERSAS FUENTES

POTENCIA WATTIOS	NIVEL DE POTENCIA, dB	FUENTE
20 - 40 10^6	195	Cohete Saturno
100.000	170	Motor Turbo-jet detrás del quemador
10.000	160	Motor Turbo-jet de potencia 3200 Kg
1.000	150	
100	140	Cuattrimotor
10	130	Orquesta con 75 instrumentos
1	120	Martillo neumático
0,1	110	Ventilador centrífugo (22.000 m ³ /h)
0,01	100	Coche en autopista
0,001	90	Voz gritando
0,00001	70	Voz conversando
0,000000001	30	Voz cuchicheando

1.6 SUMA DE NIVELES

En la práctica se presentan muchas situaciones en las que es necesario determinar el efecto conjunto de dos o más fuentes sonoras o por el contrario determinar la contribución de una determinada fuente al nivel sonoro total cuando se conoce este.

Dado que los niveles de ruido son magnitudes logarítmicas, los niveles no se podrán sumar de forma aritmética; será preciso calcular los antilogaritmos de los niveles a sumar a fin de determinar las correspondientes magnitudes físicas, sumar estas y volver a obtener el nivel total en dB.

Matemáticamente estas se expresan mediante la ecuación:

$$N_{total} = 10 \log \sum_{i=1}^n \text{anti log} \frac{L_i}{10} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}$$

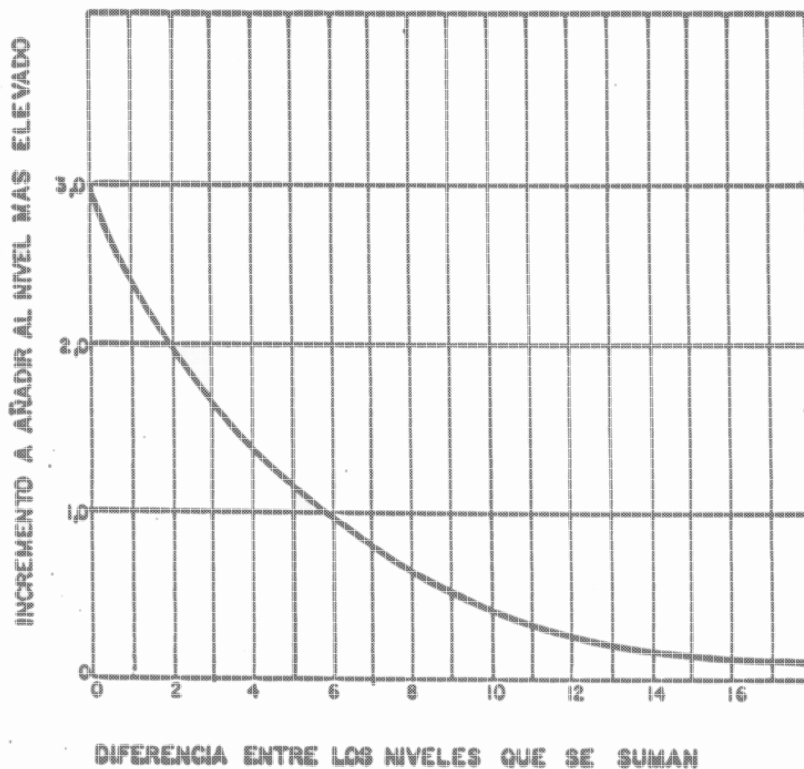
donde L_i son los n niveles a sumar.

Mediante el gráfico de la Figura 1.2 se pueden realizar estas sumas de forma rápida; así la suma de 75 dB y 77 dB(A) es $77 + 2 = 79$ dB.

Para el uso de este gráfico hay que considerar:

- Es un procedimiento aproximado, si bien el error que puede cometerse es inferior a ± 0.5 dB.
- Cuando se desee combinar varios niveles y con el fin de minimizar el error del resultado final, se deberá ordenar los niveles con orden creciente de menor a mayor, combinándose primeramente los dos menores valores; el resultado obtenido se combina con el tercero y así sucesivamente, cuidando sumar siempre los valores más pequeños.

FIGURA 1.2 GRÁFICA PARA LA ADICIÓN DE NIVELES DE RUIDO



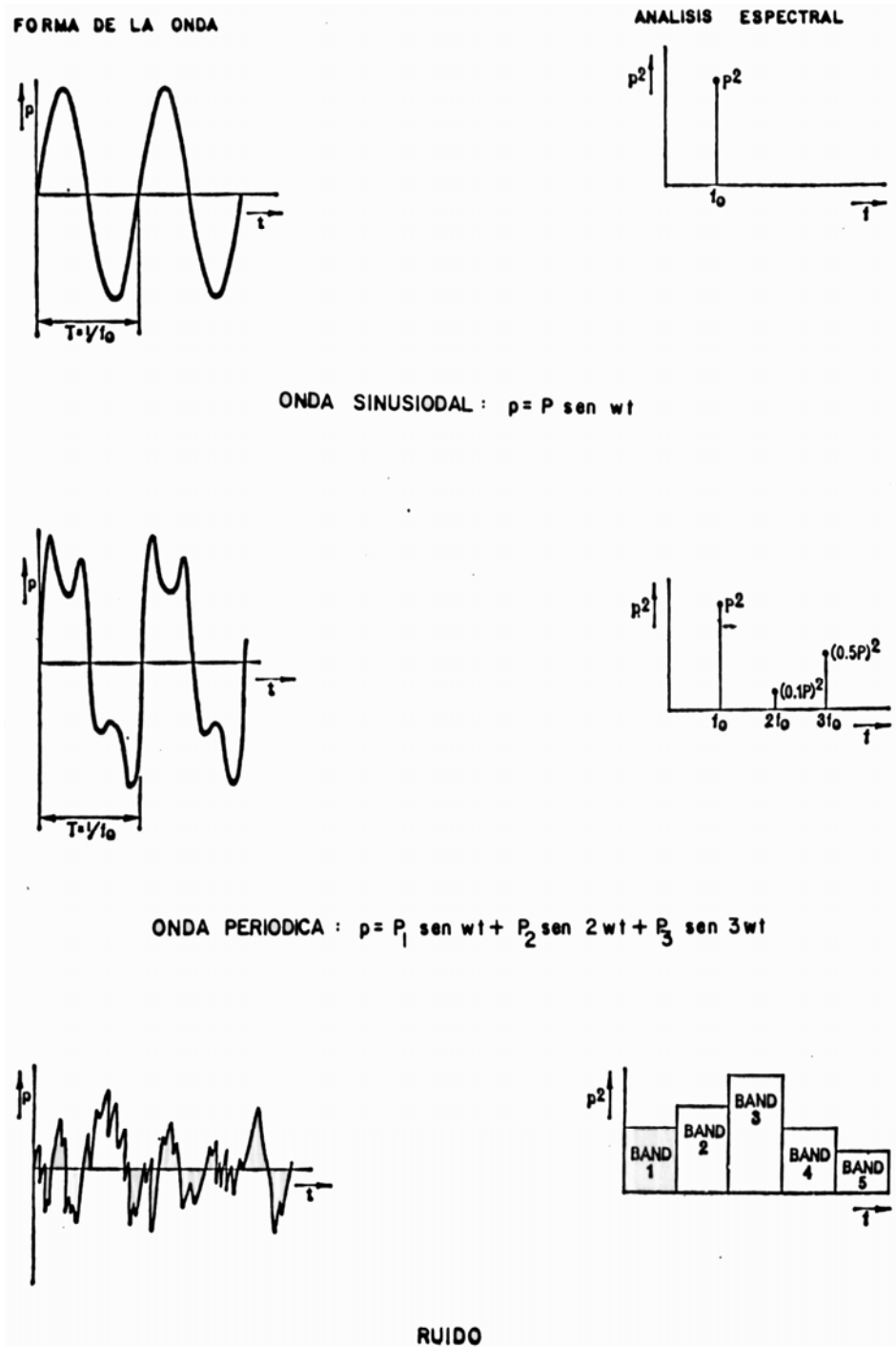
1.7 ANÁLISIS ESPECTRAL. BANDAS DE FRECUENCIA

Un sonido o tono puro es aquel que está compuesto por una sola frecuencia y cuya representación esta dada en la Figura 1.3. Matemáticamente estos sonidos se representan por una función del tipo:

$$p=P \operatorname{sen}(\omega t + \ell) \quad (1.11)$$

donde: p es la presión instantánea
 P es la amplitud de una onda sonora
 $\omega = 2\pi f$, siendo f la frecuencia de la onda sonora
 ℓ = es el ángulo de fase

FIGURA 1.3 REPRESENTACIONES DE ONDAS SONORAS Y RUIDO CON SUS ESPECTROS



Sin embargo en la mayor parte de las situaciones, los sonidos que se presentan cotidianamente son combinaciones ordenadas o desordenadas de tonos

puros. Estos sonidos compuestos reciben el nombre respectivamente de sonidos periódicos y ruido.

Los sonidos periódicos presentan una onda que repite su forma, tal es el caso de los sonidos emitidos por los instrumentos musicales (Figura 1.3), matemáticamente esto se expresa por:

$$p=P_1\text{sen}\omega_1t+P_2\text{sen}\omega_2t+\dots+P_n\text{sen}\omega_nt \quad (1.13)$$

Finalmente, en el ruido, la onda sonora no es periódica y esta constituida por numerosas fluctuaciones aleatorias distribuidas a lo largo de un amplio margen de frecuencias (Figura 1.3).

Para definir un tono puro basta conocer el nivel de presión sonora y su frecuencia. Sin embargo un sonido complejo requiere un análisis más completo. En efecto, en los sonidos complejos será preciso conocer los niveles de presión sonora para cada frecuencia audible, esto es su espectro sonoro (Figura 1.3).

Se entiende como análisis espectral de un sonido (puro o complejo), la representación gráfica o numérica de la amplitud de sus componentes en función de la frecuencia.

Los tonos puros presentan una única línea espectral, la correspondiente a su frecuencia. Los sonidos periódicos presentan una serie de líneas espectrales en las que las correspondientes a las frecuencias más altas son múltiplos enteros de la frecuencia inferior o fundamental.

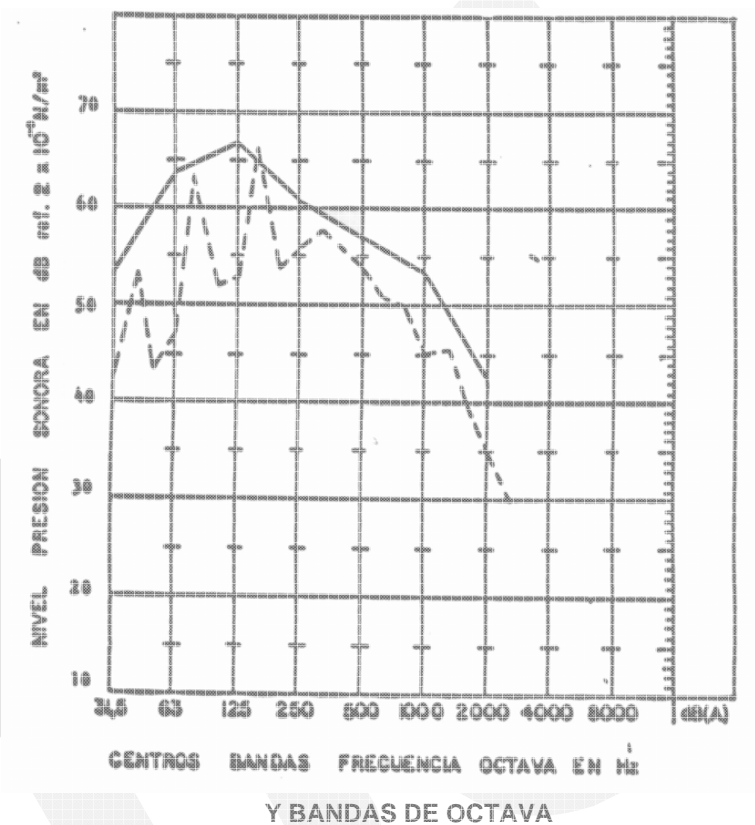
El ruido, al ser sonido complejo, con numerosas fluctuaciones aleatorias distribuidas espectralmente a través de una amplia gama de frecuencias, debiendo pues analizarse de forma estadística.

Para simplificar el problema del análisis espectral para sonidos compuestos y para el ruido, ha sido preciso dividir el rango de frecuencias audibles en segmentos o bandas continuas. La anchura de estas bandas puede ser igual para todas ellas o proporcional a su frecuencia central.

Internacionalmente se ha recomendado la utilización de bandas llamadas “octavas”, en las cuales la relación entre las frecuencias superior e inferior están en la relación 2:1. Cada una de las bandas se define por la frecuencia correspondiente al valor central de la banda (Tabla 1.5). También está recomendado el uso de bandas de tercio de octava en los que la relación entre frecuencias superior e inferior es $\sqrt[3]{2}$ (Tabla 1.5).

En la Figura 1.4 se presentan los espectros sonoros en bandas de frecuencia de 1/1 octava y 1/3 de octava del nivel sonoro generado por un ventilador. El análisis en bandas de frecuencia de 1/3 permite identificar mejor las fuentes de ruido (en estos casos la frecuencias propias del paso de las aspas del ventilador y en el punto 1.3.1).

FIGURA 1.4 ANÁLISIS ESPECTRAL DE UN RUIDO EN BANDAS TERCIO DE OCTAVA



Para conocer el nivel total de un sonido compuesto o de un ruido, conociendo el espectro del mismo, bastará sumar los niveles de cada una de las bandas de frecuencia. Esta suma se expresa en decibelios lineales o dB(L). Igualmente para conocer el nivel de ruido a una banda de octava habrá que sumar los niveles en las bandas de 1/3 correspondientes (Tabla 1.5).

En función del tipo de espectro, se pueden distinguir varios tipos de ruido:

- Random: los valores instantáneos de sus amplitudes siguen una ley probabilística aleatoria.

- Gausiano o normal: si la distribución de sus amplitudes sigue una distribución de Gauss.
- Blanco: si el nivel espectral es constante en todas las frecuencias y la energía espectral del ruido depende del ancho de banda en que sea analizado.
- Rosa: si la energía espectral es independiente del ancho de banda del análisis.

TABLA 1.5 BANDAS NORMALIZADAS DE FRECUENCIA

OCTAVAS			TERCIOS DE OCTAVA		
FRECUENCIA INFERIOR	FRECUENCIA CENTRAL	FRECUENCIA SUPERIOR	FRECUENCIA INFERIOR	FRECUENCIA CENTRAL	FRECUENCIA SUPERIOR
			17,8	20	22,4
			22,4	25	28,5
22	31,5	44	28,5	31,5	35,5
			35,5	40	44,7
			44,7	50	56,2
44	63	88	56,2	63	70,8
			70,8	80	89,1
			89,1	100	112
88	125	177	112	125	141
			141	160	178
			178	200	224
177	250	355	224	250	282
			282	315	355
			355	400	447
355	500	710	447	500	562
			562	630	708
			708	800	891
710	1000	1420	891	1000	1122
			1122	1250	1413
			1413	1600	1778
1420	2000	2840	1778	2000	2239
			2239	2500	2818
			2818	3150	3548
2840	4000	5680	3548	4000	4467

			4467	5000	5623
			5623	6300	7079
5680	8000	11360	7079	8000	8913
			8913	10000	11220
			11220	12500	14130
11360	16000	22720	14130	16000	17780
			17780	20000	22390

1.8 CURVAS DE AUDICIÓN

El oído humano no presenta igual sensibilidad para toda la gama de frecuencias audibles, sino que sonidos de diferentes frecuencias pero igual nivel de presión sonora provocan sensaciones distintas.

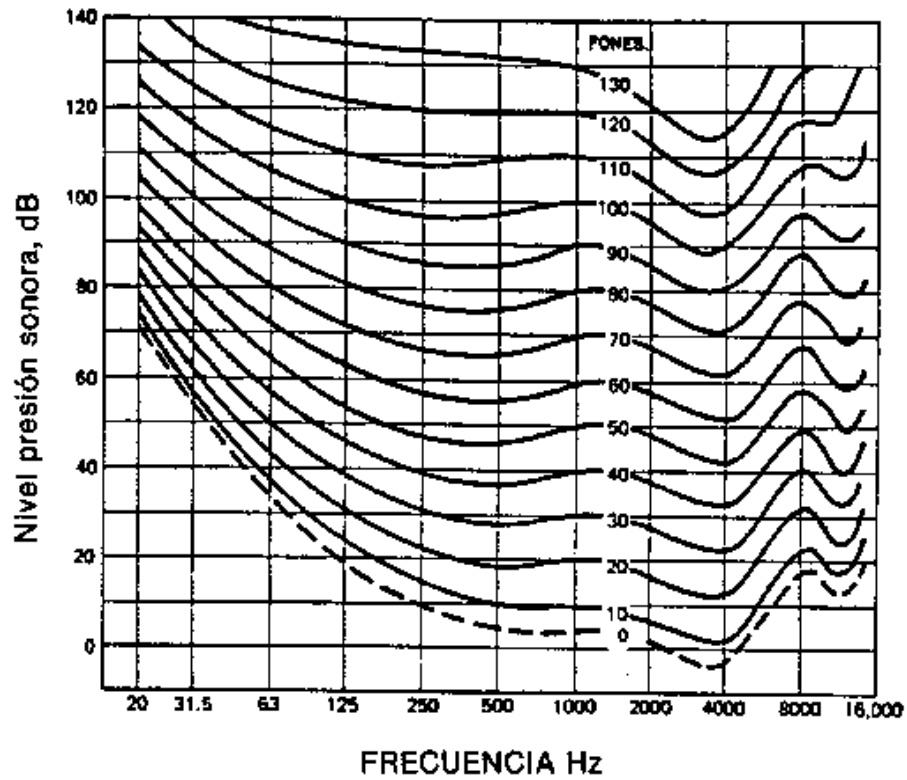
Esta variación de la sensibilidad del oído humano con la frecuencia se ha determinado a través de muy distintas encuestas y trabajos en laboratorio con un elevado número de observadores, definiéndose un conjunto de curvas de igual sonoridad para las distintas frecuencias y niveles de presión. Estas curvas se presentan en la Figura 1.5 (según la Recomendación ISO R226).

Según estas curvas, el oído es selectivo a la hora de detectar las distintas frecuencias siendo la sensibilidad del oído máxima en la zona de frecuencias comprendida entre los 1.000 Hz y los 4.000 Hz.

Estas curvas de igual nivel de sonoridad están medidas en Fones (o fonios): Se dice que un sonido compuesto o ruido tiene un nivel f de fones cuando comparado por un observador medio, se dice que tienen la misma sonoridad con un tono de referencia puro de 1.000 Hz y un nivel de presión sonora de f dB.

La unidad de sonoridad es el Son (o sonio). El son se define como la sonoridad percibida por un individuo medio al oír un tono de 1.000 Hz a un nivel de presión sonora de 40 dB. A un sonido considerado dos veces más sonoro le corresponde en esta escala un valor de 2 fones.

FIGURA 1.5 CURVAS DE IGUAL SONORIDAD

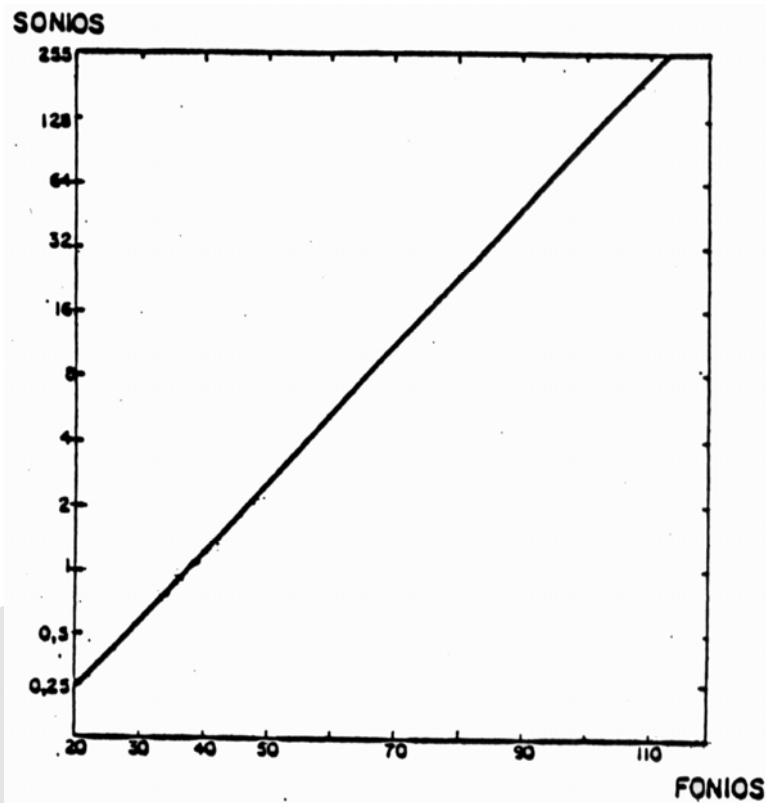


La relación existente entre la Sonoridad (S), en sones, de un ruido cualquiera y su Nivel de Sonoridad (F), en fones, es la siguiente:

$$S=2^{\frac{F-40}{10}} \quad (1.14)$$

Esta relación se presenta en forma gráfica en la Figura 1.6

FIGURA 1.6 RELACIÓN ENTRE FONIOS Y SONIOS



1.9 CURVAS DE PONDERACIÓN

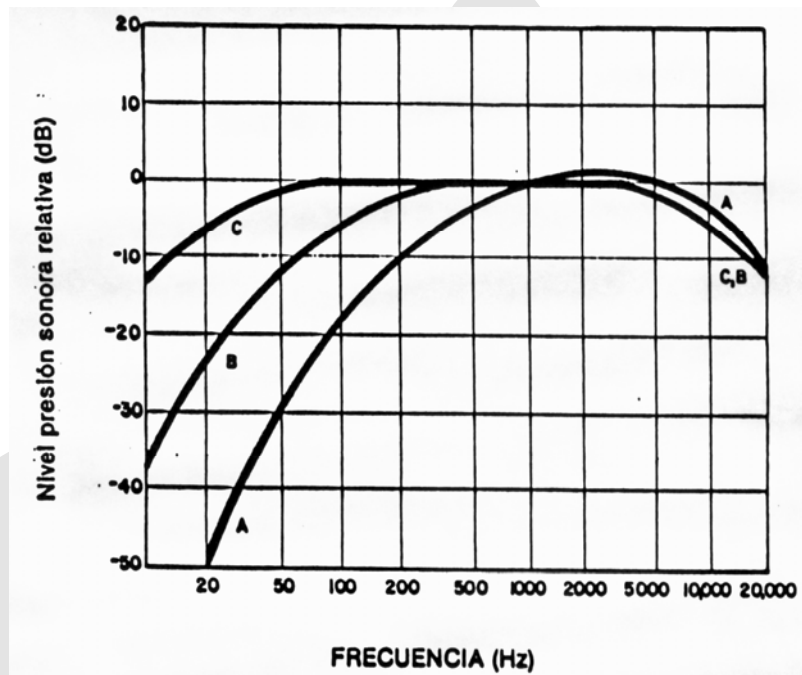
Dado que la respuesta del oído humano no es lineal con la frecuencia, la medida del ruido en términos de su nivel de presión sonora total indica de manera muy pobre lo que el individuo oye. Para simular en los equipos de medición las características de la audición, se introdujeron Redes o Curvas de Ponderación, que en definitiva no son más que unos filtros electrónicos que modifican la señal acústica según unas determinadas correcciones para cada una de las bandas de frecuencia.

Las tres redes de compensación normalmente utilizadas son aquellas que se indican en la Figura 1.7 y que cumplen:

- La red "A", que corresponde con el contorno de 40 fones y corrige las frecuencias altas y bajas.

- La red “B”, que recuerda el contorno de 70 fones y rectifica las frecuencias muy bajas.
- La red “C”, que corresponde a una respuesta prácticamente lineal.

FIGURA 1.7 CURVAS NORMALIZADAS DE COMPENSACIÓN A, B Y C



Las medidas obtenidas por lectura directa en los sonómetros usando estos filtros reciben el nombre de Niveles Sonoros expresados en dB(A), dB(B) y dB(C) dependiendo de la red usada. En la Tabla 1.6 se muestran las correcciones a aplicar en los niveles de presión sonora en bandas de octava con el fin de obtener los niveles sonoros.

TABLA 1.6 CORRECCIONES PARA EL CÁLCULO DE LOS NIVELES SONOROS

BANDA FRECUENCIAS, HZ	CORRECCIÓN EN DB		
	RED A	RED B	RED C
31,5	- 39	- 17	- 3
63	- 26	- 9	- 1
125	- 16	- 4	0

250	- 9	- 1	0
500	- 3	0	0
1000	0	0	0
2000	+ 1	0	0
4000	+ 1	- 1	- 1
8000	- 1	- 3	- 3

Esta Tabla 1.6 indica que la sensación sonora que percibimos de un sonido depende de la frecuencia; así un tono puro a 1.000 Hz y con un nivel de presión sonora de 70 dB, se escucha como $70 - 0 = 70$ dB(A); por el contrario un tono del mismo nivel pero centrado a 125 Hz, se escucharía como $70 - 16 = 56$ dB(A).

Inicialmente se pretendía que la red A se usara para medir niveles de presión inferiores a 55 dB; la red B, para niveles comprendidos entre 55 dB y 85 dB; y la red C para niveles superiores a 85 dB. Sin embargo en la actualidad es la red A la que se utiliza más ampliamente por correlacionar mejor con la respuesta subjetiva del individuo y de la comunidad frente al ruido.

1.10 VARIACIÓN DEL RUIDO CON EL TIEMPO. NIVEL CONTINUO EQUIVALENTE

La variación con el tiempo de los niveles de ruido o de los niveles sonoros permite su clasificación en:

- Continuos o Constantes

Son aquellos ruidos en los que ni los niveles de presión acústica, ni su espectro de frecuencia, varían con el tiempo.

- Fluctuantes

Es aquel ruido en que el nivel de presión acústica y el espectro de frecuencias varían constantemente entre límites estrechos. En algunos casos, como por ejemplo en las prensas excéntricas, la variación del nivel de presión acústica y el espectro de frecuencias es periódica.

Es el tipo de ruido más común que se presenta en la industria, y en general, puede descomponerse en un ruido de fondo con pequeñas variaciones del nivel de presión acústica.

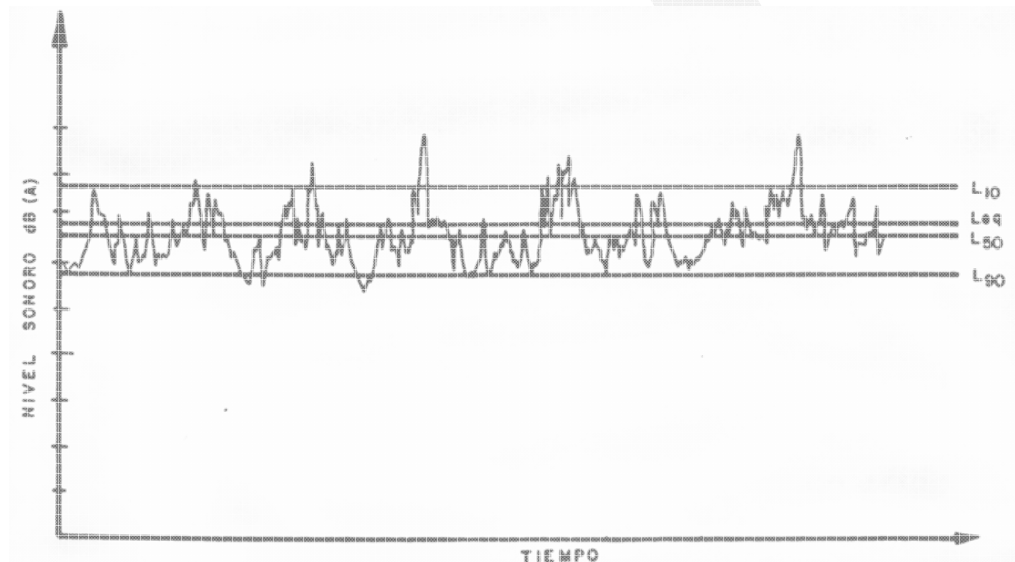
- De Impacto o de Impulso

Es un proceso sonoro de muy corta duración ($t < 200$ mseg) y de un nivel de presión acústica relativamente elevado y pueden estar originados por el choque de dos superficies sólidas o por una explosión.

- Aleatorios

Constituyen la característica más común para la mayor parte de los ruidos, especialmente el ruido ambiental (Figura 1.8).

FIGURA 1.8
VARIACIÓN CON EL TIEMPO DEL NIVEL SONORO PRODUCIDO POR TRÁFICO



Una magnitud que varía con el tiempo de manera mas o menos continua habrá que estudiarla y describirla con métodos estadísticos. En este sentido la información facilitada por el Nivel Medio indica muy poco de las variaciones de nivel a lo largo del tiempo; acompañar este nivel con los valores máximos y mínimos tampoco es suficiente para poder corresponder a situaciones límite.

Mayor información la facilitan los Niveles Percentiles (L_n) es decir, aquellos excedidos durante un terminado porcentaje de tiempo (por ejemplo L10 es el nivel superado durante el 10% del tiempo); si bien se requiere cinco o seis de estos niveles para tener una descripción adecuada del ruido.

En los ruidos que varían aleatoriamente con el tiempo es útil la utilización del Nivel Continuo Equivalente (L_{eq}) definido como el nivel continuo que tiene la

misma energía que el ruido fluctuante durante el período de tiempo considerado. Esto se expresa matemáticamente por la expresión:

$$Leq = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \quad (1.15)$$

donde: T = período de tiempo considerado
L(t) = nivel de ruido instantáneo

En la ecuación (1.15) Si L(t) es el nivel de presión sonora instantáneo del ruido en banda de frecuencia, Leq será el nivel continuo equivalente, en dB, para cada una de dichas bandas. Si L(t) es el nivel sonoro instantáneo en dB(A), Leq será el Nivel Sonoro Continuo Equivalente en dB(A).

Igualmente si T es el período de tiempo comprendido por ejemplo entre las 08:00 horas y 22:00 horas, Leq será el Nivel Continuo Equivalente Diurno (NED); si T es el período de tiempo comprendido entre las 22:00 horas y 08:00 horas, Leq será el Nivel Continuo Equivalente Nocturno (NEN). Si T es 24 horas, se obtiene el Nivel Continuo Equivalente 24 horas (L24).

Esta ecuación podría también expresarse para valores discretos como:

$$Leq = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}$$

Otro índice de medida del ruido es el Nivel día/noche que se define como el nivel sonoro continuo equivalente durante un período de tiempo de 24 horas, añadiendo una corrección de 10 dB al nivel sonoro continuo equivalente de la noche. Esta corrección está originada por la mayor interferencia o molestia que produce la exposición al ruido durante el período nocturno.

Esto se puede expresar mediante la ecuación:

$$Ldn = 10 \log \frac{1}{24} \left[14 \left(10^{\frac{NED}{10}} \right) + 10 \left(10^{\frac{(NEN+10)}{10}} \right) \right] \quad (1.16)$$

donde: NED = Leq para el período de día (08:00 – 22:00 horas)
NEN = Leq para el período de noche (22:00 – 08:00 horas)

2 PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN CAMPO LIBRE

2.1 PROPAGACIÓN DEL SONIDO

La energía sonora radiada por una fuente se distribuye en todas direcciones en su propagación por el espacio abierto (campo libre), alcanzando áreas muy alejadas de dicha fuente.

En el campo libre, una fuente puntual con un Nivel de Potencia Sonora NWS, produce en un punto situado a una distancia r en metros de ella, un Nivel de Presión Sonora, NPS, dado por:

$$NPS = NWS - 20 \log r - 11 - A + DI \quad (2.1)$$

donde: A es el exceso de atenuación debido a causas ambientales.

DI es el índice de direccionalidad definido como:

$$DI = 10 \log Q \quad (2.2)$$

Siendo Q el Factor de Direccionalidad, definido, para una frecuencia determinada, como la relación entre el valor cuadrático medio de la presión sonora a una distancia fija del equipo de medidas y para una dirección específica y la presión cuadrática media para la misma distancia, promediada sobre todas las direcciones.

Los valores teóricos más usuales de Q son 1, 2, 4 y 8, dependiendo que la fuente sonora esté situada, respectivamente, en el centro del espacio abierto, sobre una superficie, en la intersección de dos planos y en la intersección de tres planos (Figura 2.1).

Según la ecuación anterior, la variación teórica del Nivel de Presión Sonora con la distancia, para una misma fuente y en la misma dirección, es:

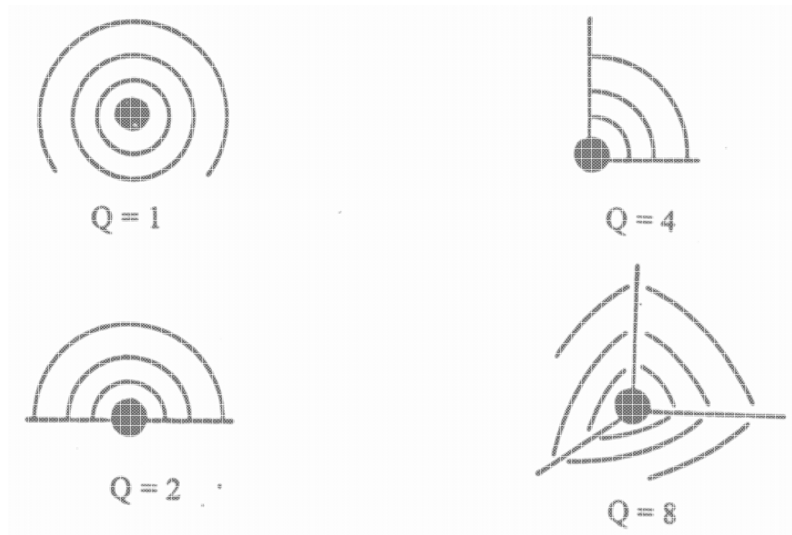
$$NPS_2 = NPS_1 - 20 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) - \Delta A \quad (2.3)$$

donde: r_2, r_1 distancia a la fuente sonora, siendo $r_2 > r_1$

NPS_1, NPS_2 niveles de presión sonora a la distancia r_1 y r_2

ΔA exceso de atenuación para la distancia $r_2 - r_1$

FIGURA 2.1 FACTORES DE DIRECCIONALIDAD



Es decir, en ausencia de ΔA , existirá una disminución de 6 decibelios cada vez que se dobla la distancia a la fuente sonora, esto es la característica de campo libre y es debido a la divergencia de las ondas sonoras en su propagación.

En el caso de tratarse de una fuente sonora lineal (una carretera con tráfico por ejemplo), la variación teórica es de 3 decibelios por doble de distancia:

$$NPS_2 = NPS_1 - 10 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) - \Delta \quad (2.4)$$

Siendo: $r_2 > r_1$

Nota: Todas las ecuaciones anteriores son aplicables a cada frecuencia o banda de frecuencia según los casos.

2.2 ATENUACIÓN DEL SONIDO EN SU PROPAGACIÓN

En la práctica la propagación de las ondas sonoras en espacios abiertos tal y como se indica en la ecuación anterior se ve afectada por factores muy diversos. Así, las fuentes reales solo pueden considerarse puntuales a distancias grandes; la atmósfera no es uniforme pues presenta turbulencias, gradientes de temperatura, etc. Igualmente existen irregularidades topográficas, masas arbóreas, etc.

En resumen, entre los factores que pueden afectar a la propagación del sonido destacan:

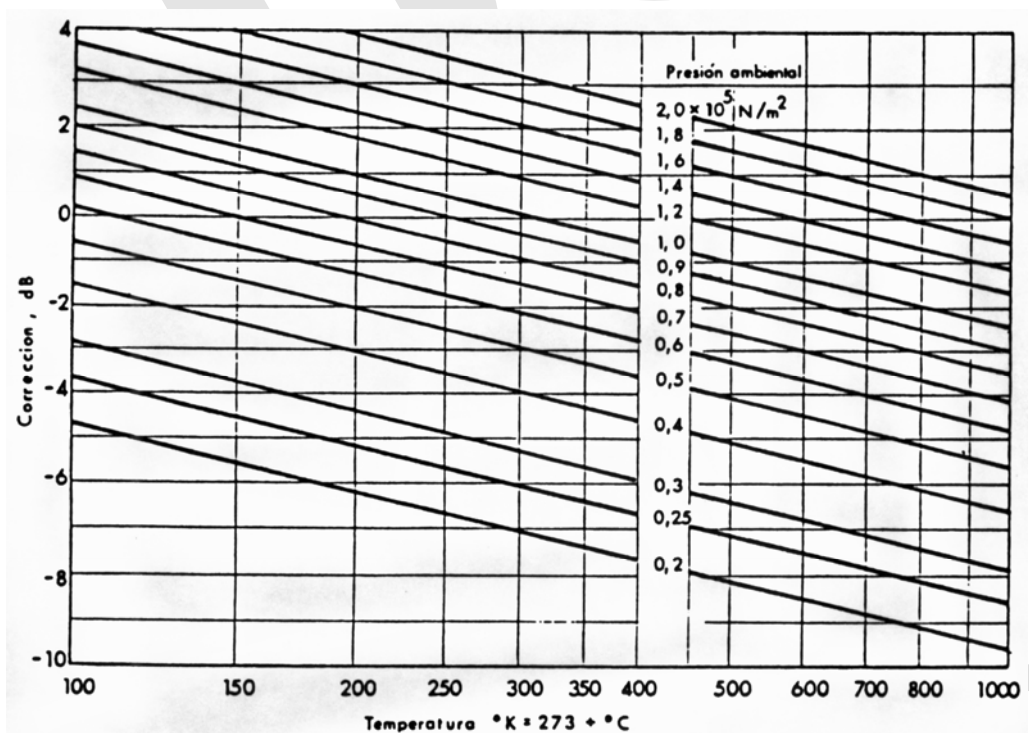
- Variación de las condiciones normales de presión y temperatura.
- Absorción del aire.
- Variación a gradiente de temperatura y viento.
- Presencia de fenómenos atmosféricos (lluvia, niebla, nieve, etc.).
- Presencia de barreras acústicas.
- Efectos de la vegetación.
- Terreno

Estos fenómenos pueden presentarse tanto de forma individual como simultáneamente.

2.2.1 ATENUACIÓN DEBIDA A LA VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES NORMALES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA

La ecuación anterior ha sido obtenida suponiendo que el producto de la densidad del aire por la velocidad del sonido es $400 \text{ Kg m}^2/\text{s}$. Consecuentemente cualquier variación de las condiciones ambientales de presión y temperatura que modifiquen dicho valor deberán tenerse en consideración y se aplicarán las correcciones que se indican en la Figura 2.2.

FIGURA 2.2
CORRECCIONES A APLICAR EN LAS LECTURAS DE LOS NIVELES DE PRESIÓN SONORA CUANDO VARIAN LAS CONDICIONES AMBIENTALES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA



2.2.2 ABSORCIÓN DEL AIRE

La atenuación que sufren las ondas sonoras en su propagación por el aire se debe en primer lugar a una pérdida de energía originada por efectos de la viscosidad, conducción del calor, etc. Esta atenuación se llama clásica y es significativa para las altas frecuencias. En segundo lugar existe una pérdida de energía sonora al hacer vibrar las ondas sonoras a la molécula de O₂. Esta última atenuación es importante para todas las frecuencias.

La absorción del sonido por el aire depende de la temperatura y de la humedad relativa, es mínima para distancias a la fuente sonora inferiores a 150 – 200 metros y comienza a ser significativa a partir de los 1.000 Hz.

La atenuación debida al aire a 20° C de temperatura para una determinada frecuencia puede calcularse según la expresión:

$$A = \left(\frac{f}{1000} \right)^{2/3} \frac{0.28}{20+100H} \text{ dB/m} \quad (2.5)$$

siendo f y H respectivamente la frecuencia en Hz y la humedad relativa en %. Para otras temperaturas los valores de la ecuación anterior se incrementan o reducen en un 10% para cada intervalo de 5° C.

En la Figura 2.3 se presentan los valores medios de la atenuación ofrecida por el aire para las distintas bandas de frecuencias en función de la distancia a la fuente mientras que en la Tabla 2.1 se muestran las atenuaciones medias para las distintas bandas de frecuencia en función de la humedad relativa y la temperatura.

FIGURA 2.3 ATENUACIÓN MEDIA DEL SONIDO DEBIDO AL AIRE EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA A LA FUENTE

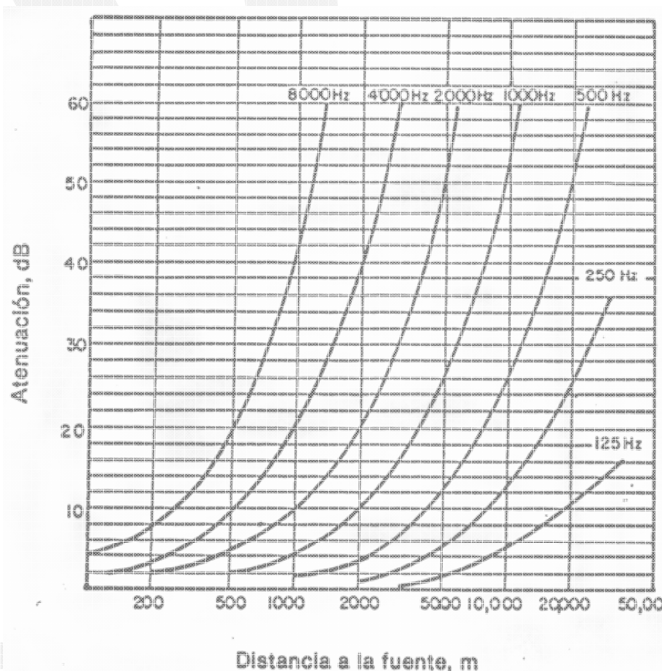


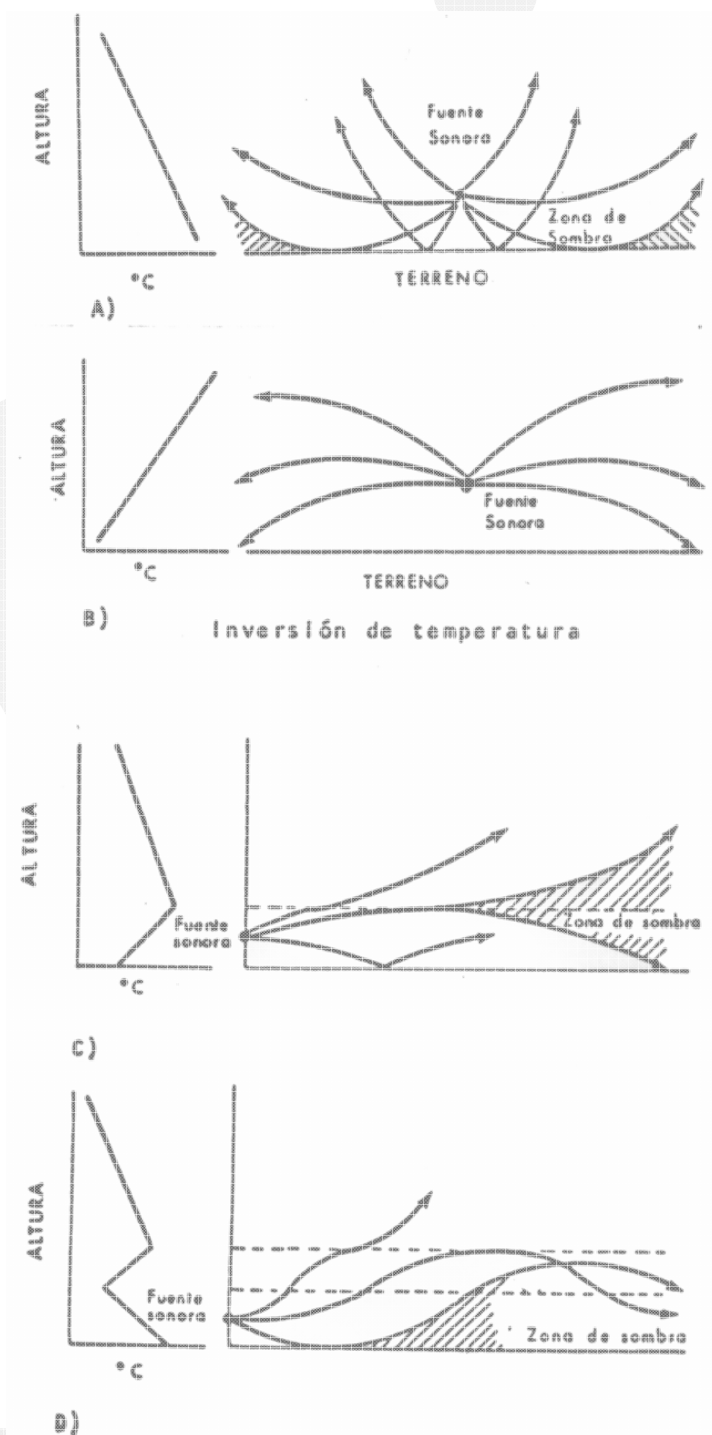
TABLA 2.1 ATENUACIÓN DEL SONIDO POR EL AIRE, SEGÚN ISC TC43

FRECUENCIA BANDA DE OCTAVA EN Hz	TEMPERATURA °C	ATENUACIÓN EN dB/100 m CON UNA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE						
		40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
63	0 – 30	0	0	0	0	0	0	0
125	0 – 30	0	0	0	0	0	0	0
250	0 – 30	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
500	0 – 15	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
	> 15 – 30	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1000	0	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2
	5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
	10	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
	15	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
	20	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	25	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	30	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2000	0	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0
	5	2,0	1,6	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7
	10	1,5	1,2	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
	15	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4
	20	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3
	25	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2
	30	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
4000	0	7,4	6,8	6,0	5,3	4,6	4,1	3,7
	5	7,1	6,3	5,3	4,6	4,0	3,7	3,3
	10	6,9	5,4	4,6	3,9	3,4	3,1	2,8
	15	5,6	4,4	3,6	3,0	2,6	2,3	2,1
	20	3,2	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,2
	25	2,5	2,0	1,6	1,3	1,2	1,1	0,9
	30	2,0	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8
8000	0	14,0	15,5	16,0	15,0	14,5	14,0	13,0
	5	17,5	17,0	15,0	14,0	12,5	11,5	10,5
	10	17,5	15,0	13,0	11,0	9,8	8,8	7,9
	15	15,0	12,5	10,5	8,9	7,5	6,6	6,0
	20	12,0	9,8	8,1	6,3	5,9	5,2	4,6
	25	9,5	7,8	6,5	5,3	4,6	4,1	3,7
	30	7,5	6,0	5,0	4,3	3,8	3,3	3,0

2.2.3 ATENUACIÓN DEBIDA A LA TEMPERATURA

La velocidad del sonido depende de la temperatura (Punto 1.1), consecuentemente cualquier variación de ésta, por ejemplo, con la altura sobre el suelo, afectará a la propagación del sonido en el aire al generarse fenómenos de difracción de las ondas sonoras.

FIGURA 2.4 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA CON LA ALTURA EN LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN LA ATMÓSFERA



En condiciones normales, la temperatura decrece con la altura sobre el suelo y en consecuencia la velocidad del sonido también decrece, originando que los rayos sonoros se propaguen como se indica en la Figura 2.4.a, esto es, curvándose hacia arriba. Las inversiones de temperatura originará por el contrario fenómenos como los indicados en la Figura 2.4.b, esto es, que se curven hacia el suelo.

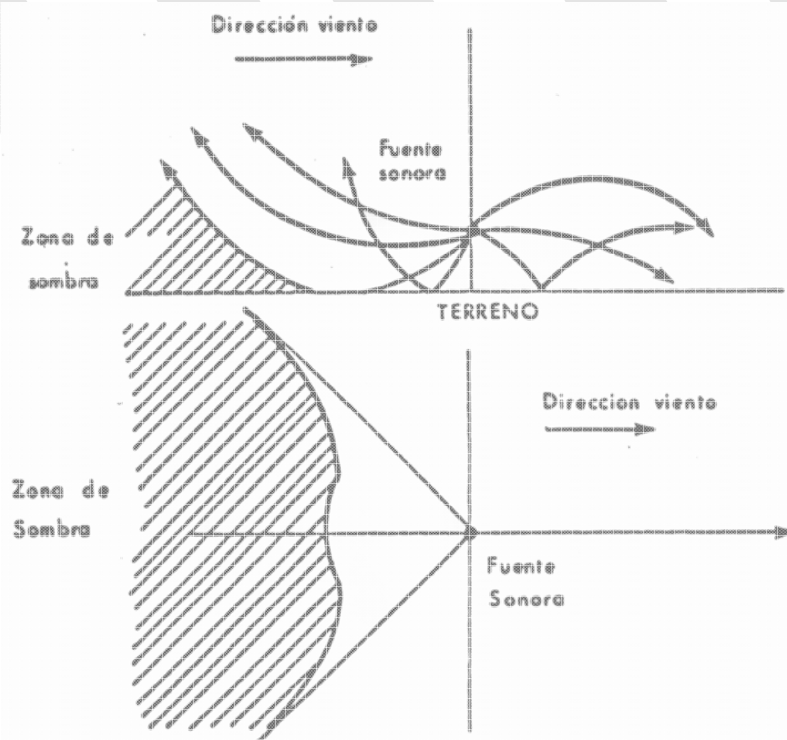
En la primera de las situaciones anteriores se producirán sombras sonoras, no así en la segunda de ellas. Las inversiones de temperatura origina que en puntos alejados de la fuente sonora se produzcan niveles sonoros más elevados que los que se producirían en condiciones normales.

2.2.4 ATENUACIÓN DEBIDA AL VIENTO

Si se define el sonido como una perturbación que se propaga por un medio elástico como es el aire, cualquier movimiento de éste (viento), afectará a la propagación de las ondas sonoras.

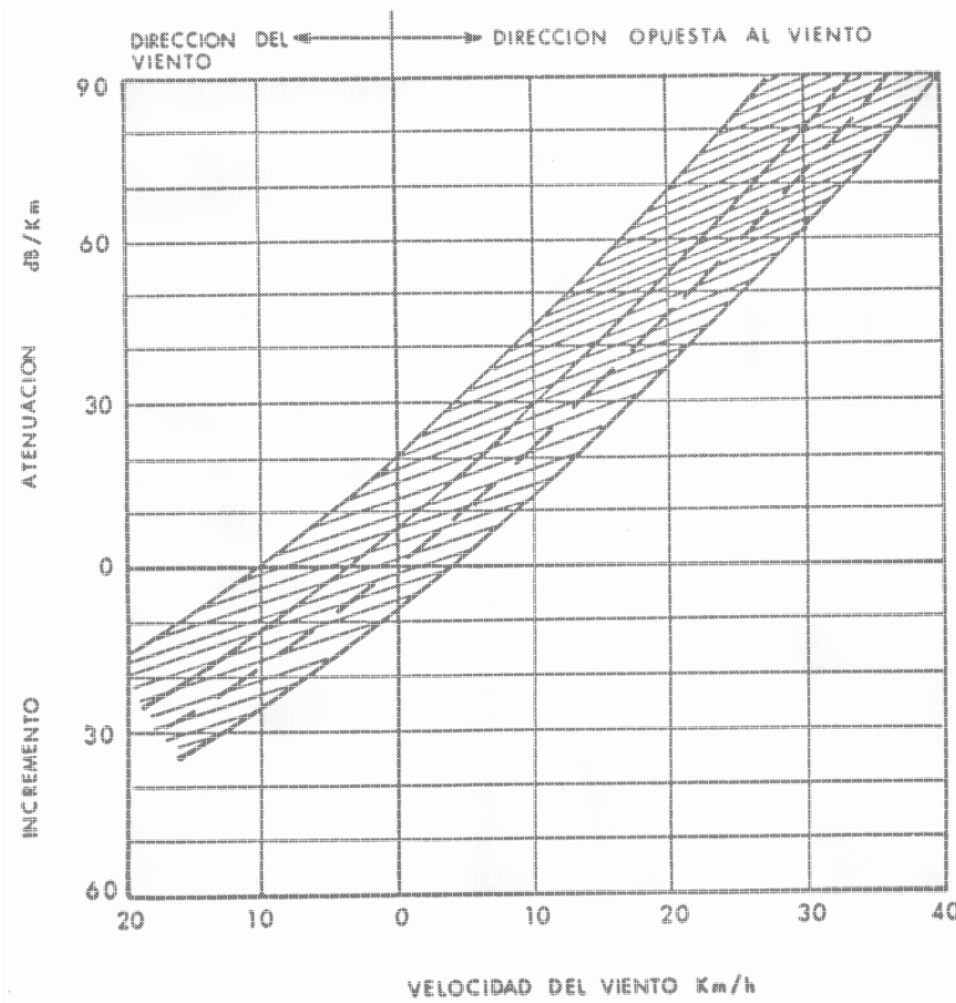
Así, el sonido se propaga mejor en la dirección del viento tal y como se indica en la Figura 2.5. Igualmente gradientes positivos del viento (aumento de la velocidad con la altura del suelo) modificarán la trayectoria de las ondas que serán afectadas dando lugar a zonas de sombra acústica y a reforzamientos.

FIGURA 2.5 EFECTOS DEL VIENTO EN LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN LA ATMÓSFERA



En la Figura 2.6 se presenta la variación de los niveles sonoros debido a la influencia del viento en la propagación de las ondas sonoras.

FIGURA 2.6 VALORACIÓN DE LOS EFECTOS DEL VIENTO EN LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO POR LA ATMÓSFERA



2.2.5 TURBULENCIAS

La presencia de fluctuaciones rápidas de viento origina variaciones de nivel de hasta 10 – 20 dB. Estas fluctuaciones son normalmente superiores en la dirección opuesta en que se propaga el viento.

2.2.6 ATENUACIÓN DEBIDA A LLUVIA, NIEVE Y NIEBLA

Las atenuaciones debidas a estos fenómenos atmosféricos están relacionadas con las derivadas de las condiciones de humedad, temperatura, viento, etc. que les acompañan, siendo, pues, efectos secundarios de estos y en consecuencia se puede suponer, sin grave error, que su valor es nulo.

No obstante, la presencia de estos fenómenos meteorológicos origina una notable disminución de las actividades propias de la comunidad y consecuentemente el nivel del ruido de fondo se reduce, produciéndose entonces la sensación de que el sonido se propaga con mayor facilidad.

2.2.7 ATENUACIÓN DEBIDA A LA VEGETACIÓN

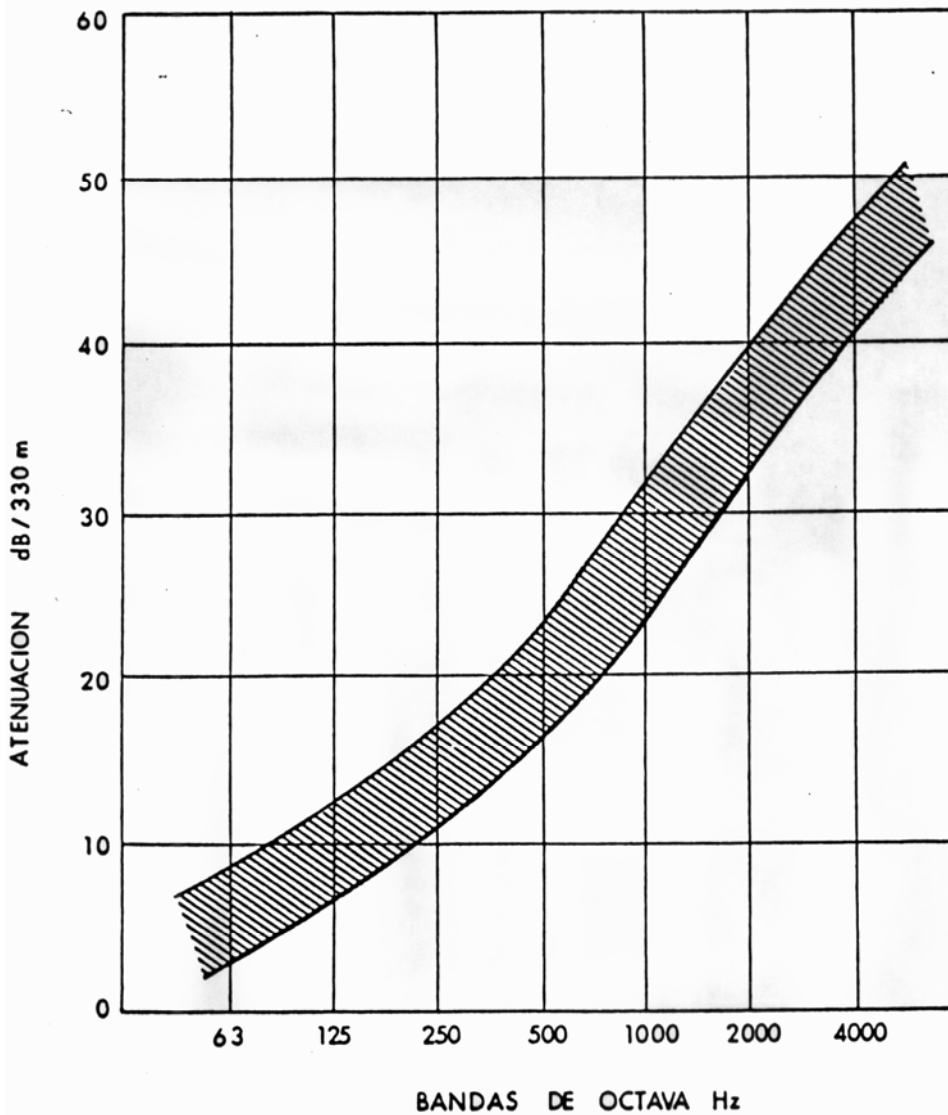
La atenuación debida a la vegetación es importante cuando las extensiones cubiertas son superiores a 100 – 200 metros. En general se puede establecer que los árboles producen en la mayor parte de las situaciones más una sensación subjetiva de atenuación del sonido que un efecto real.

En la Tabla 2.2 se muestran los valores de las atenuaciones ofrecidas por diversos tipos de vegetación, mientras que en la Figura 2.7 se muestran las atenuaciones medidas para vegetación muy densa.

TABLA 2.2 ATENUACIÓN SONORA PARA PROPAGACIÓN SOBRE DISTINTOS TIPOS DE VEGETACIÓN (dB/100 m.)

TIPO DE VEGETACIÓN	FRECUENCIA (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Hierba escasa 0,1 - 0,2 m de altura	0,5	-----	-----	3	-----	-----
Hierba espesa 0,4 – 0,5 m de altura	0,5	-----	-----	12	-----	-----
Árboles hoja perenne	7	11	14	17	19	20
Árboles hoja caduca	2	4	6	9	12	16

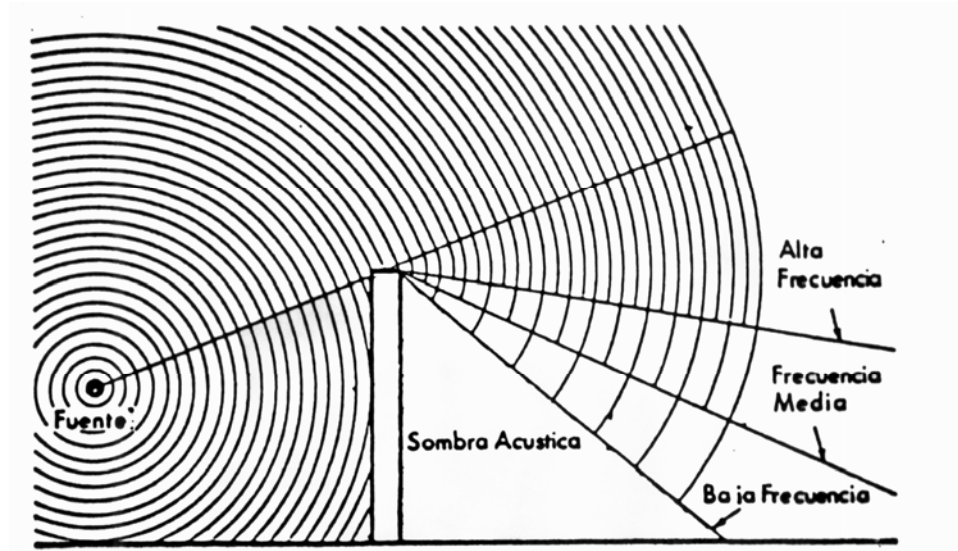
FIGURA 2.7 ATENUACIÓN ACÚSTICA OFRECIDA POR VEGETACIÓN MUY Densa (VISIBILIDAD 20 – 30 METROS)



2.2.8 ATENUACIÓN DEBIDA A LAS BARRERAS ACÚSTICAS

Se definen barreras acústicas como aquellas superficies naturales o artificiales con suficiente masa superficial (al menos 20 Kg/m²), que se interponen en la marcha de las ondas sonoras impidiendo su propagación y creando en su parte posterior una zona silenciosa llamada "sombra-acústica" (Figura 2.8).

FIGURA 2.8 ESQUEMA DE BARRERA ACÚSTICA



Esta atenuación esta debida a la difracción que sufren las ondas sonoras al alcanzar los bordes de las barreras.

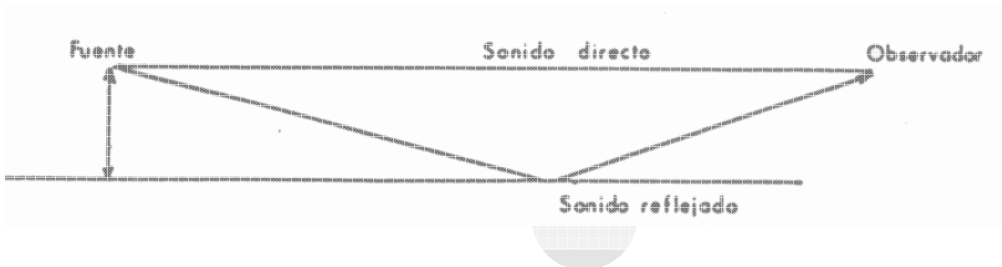
La atenuación de la barrera depende no sólo de sus dimensiones físicas, sino también de las distancias relativas entre el observar y la fuente a ella (Punto 2.5).

2.2.9 ATENUACIÓN DEBIDA AL TERRENO

Cuando las ondas sonoras se propagan a muy baja altura, existe una atenuación debido a su interacción con el terreno. Es evidente que esta absorción dependerá del tipo de terreno, así para las frecuencias entre 200 Hz y 1.000 Hz los coeficientes de absorción varían entre 0.22 y 0.53 para terrenos cubiertos de hierba corta y 0.04 y 0.023 para suelos pedregosos.

Por otra parte hay que señalar que existe una atenuación del sonido debida a la interferencia entre el sonido directo y el reflejado (Figura 2.9) que se manifiesta para frecuencias medias (100 – 500 Hz) y fuentes sonoras situadas a 2 – 3 metros sobre el suelo separadas del observador 200 – 250 metros, y que llega a alcanzar valores de 10 – 40 dB.

FIGURA 2.9
ESQUEMA DE LA INTERFERENCIA ENTRE LOS SONIDOS DIRECTOS Y REFLEJADOS



3 EFECTOS DEL RUIDO

3.1 INTRODUCCIÓN

El ruido ha sido definido como “todo sonido no deseado”. Si bien esta definición implica un carácter subjetivo del mismo, los efectos del ruido en el hombre distan mucho de comprender sólo este carácter.

Así, el ruido puede producir:

- Efectos fisiológicos (deterioro de la audición).
- Efectos psicológicos (interferencia con la comunicación hablada y con el descanso y el sueño).
- Efectos en el trabajo.
- Efectos subjetivos (molestia e irritación).
- Efectos directos sobre la salud.

De entre estos efectos, sólo los fisiológicos podrán conocerse, con razonable exactitud, mediante el uso del equipo instrumental adecuado, mientras que el resto de dichos efectos se podrán determinar mediante la respuesta subjetiva de los individuos expuestos al ruido, con lo cual deberán emplearse métodos estadísticos para su estudio.

3.2 EFECTOS FISIOLÓGICOS

El oído humano no presenta igual sensibilidad para todo el rango de las frecuencias audibles (aproximadamente, de 20 a 20.000 Hz); por otra parte, existirán variaciones lógicas entre los valores mínimos de presión sonora detectables por cada uno de los individuos. Sin embargo, se ha podido determinar cuáles son los mínimos detectables, llamándose al conjunto de estos niveles “umbral de audición” (Figura 3.1).

Este umbral de audición varía con la edad del individuo, fenómeno clínicamente conocido como presbiacusia. Las Figuras 3.2 y 3.3 presentan la presbiacusia previsible, en hombres y mujeres, para diversas frecuencias en función de la edad del individuo.

FIGURA 3.1 CAMPO AUDITIVO

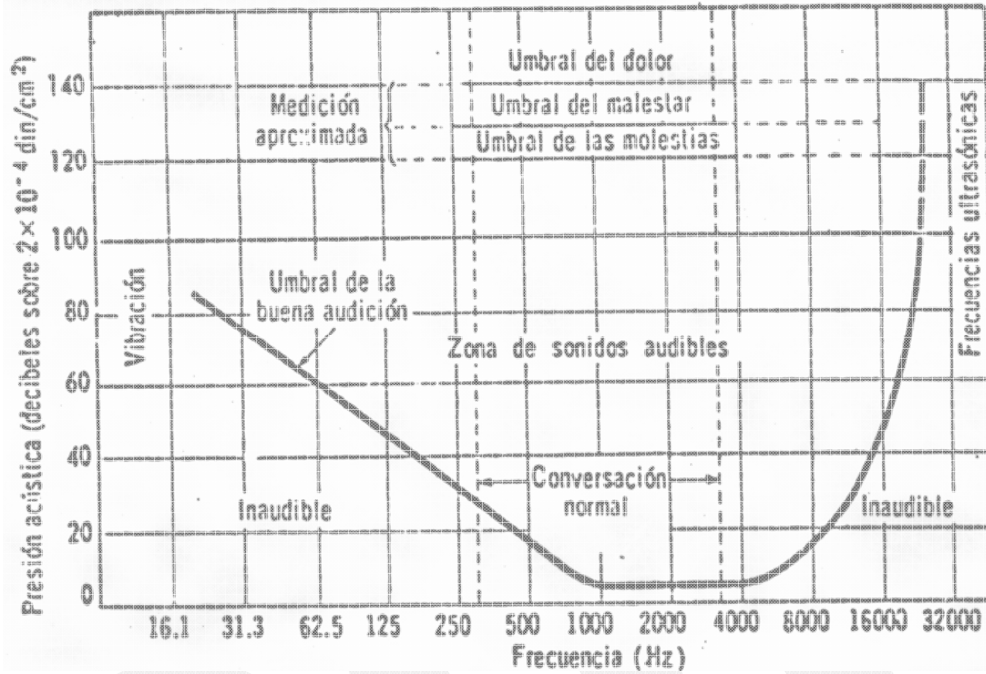
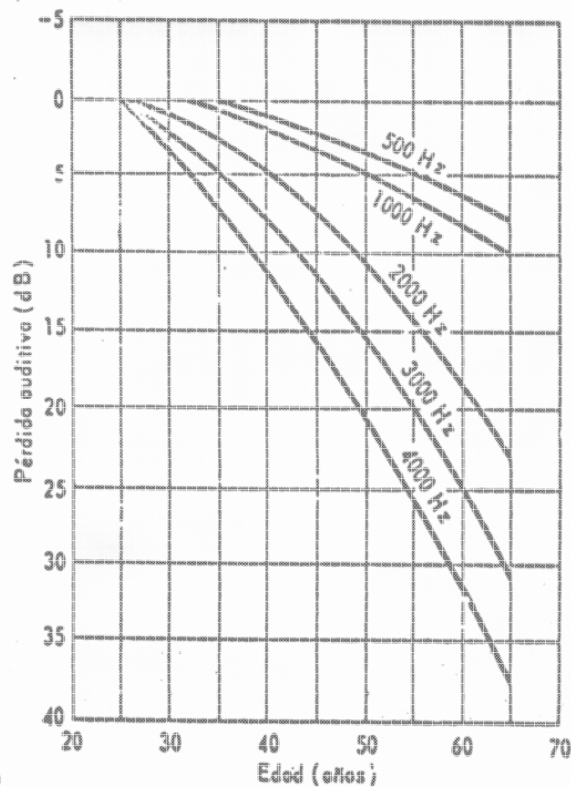
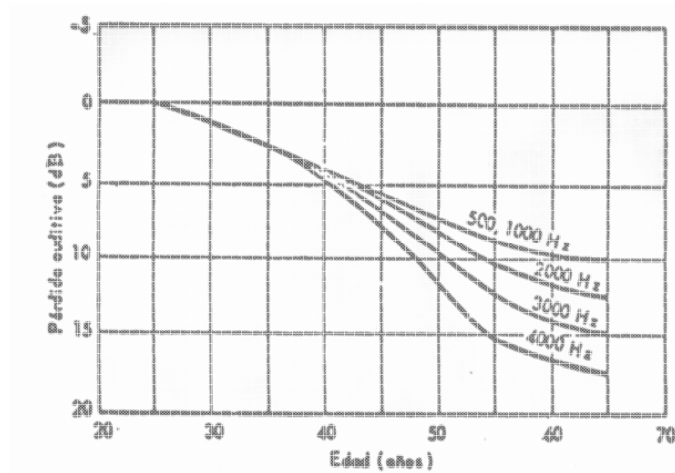


FIGURA 3.2 CURVAS DE PRESBIACUSIA EN LOS HOMBRES: PÉRDIDA AUDITIVA MEDIA PREVISIBLE CON LA EDAD



**FIGURA 3.3 CURVAS DE PRESBIACUSIA EN LAS MUJERES:
PÉRDIDA AUDITIVA MEDIA PREVISIBLE CON LA EDAD**



Además de esta pérdida progresiva de audición debida a la edad existen otras causas que pueden producir sordera, que según la parte del oído afectada, son:

- Oído externo: Taponamiento completo del canal, debido a secreciones de cera, tumores, etc.
- Oído medio: Ruptura de la membrana timpánica, otosclerosis, otitis medias, fibrosis, etc.
- Oído interno: Pérdidas de audición congénitas, enfermedad de Menière, infecciones vesiculares, exposiciones prolongadas a niveles excesivos de ruidos o exposiciones instantáneas a niveles muy altos producidos por impactos, etc.

La presencia de tumores cerebrales o tumores en el nervio transmisor son también causa de sordera. Incluso puede no existir daño físico y presentarse un tipo de sordera, llamado no orgánica, que puede ser imaginaria, supuesta, por histeria, etc.

El ruido es, pues, una de las causas que pueden originar la pérdida de audición en los individuos.

La comisión I.S.O. establece en su Recomendación R-1999, que existe un deterioro de audición originada por ruido o sordera profesional cuando la media aritmética de las pérdidas auditivas para las frecuencias de 500, 1.000 y

2.000 Hz supera 25 dB. En la Tabla 3.1 se presenta la clasificación en función del grado de sordera de las pérdidas de audición media del oído.

TABLA 3.1 CLASIFICACIÓN DE LA PÉRDIDA MEDIA AUDITIVA

CLASE	GRADO	PÉRDIDA AUDITIVA MEDIA	OBSERVACIONES
I	Normal	Menos de 15 dB	Dentro de límites normales
II	Casi Normal	15 – 25 dB	Sin dificultad para la conversación ordinaria a distancias hasta 6 m
III	Pérdida ligera	25 – 40 dB	Dificultad para la conversación ordinaria cuando la distancia excede de 1,5 m
IV	Pérdida moderada	40 – 65 dB	Dificultad para la conversación en voz alta cuando la distancia excede de 1,5 m
V	Pérdida grave	65 – 75 dB	Dificultad para entender lo que se dice a gritos cuando la distancia excede de 1,5 m
VI	Pérdida muy grave	75 – 80 dB	Dificultad para entender lo que se dice a gritos a menos de 1,5 m
VII	Pérdida prácticamente total	Más de 85 dB	Pérdida prácticamente total de la audición para comunicación oral

De forma general se puede establecer que la pérdida de audición inducida por ruido (PAIR) presenta las características siguientes:

- Es irreversible, por la incapacidad de regeneración de las células ciliares de la audición.
- Puede prevenirse, ya que se conocen los niveles sonoros a partir de los cuales existe riesgo de sordera.
- No es progresiva siempre que el oído lesionado deje de estar sometido a los niveles de ruido estimados peligrosos.
- Cada individuo presenta una susceptibilidad distinta al ruido.
- La sordera puede ir acompañada de otros efectos secundarios (taquicardias, pitidos en los oídos, vómitos, etc.).

3.2.1 EVOLUCIÓN DE LA PERDIDA DE AUDICIÓN INDUCIDA POR RUIDO

El oído, como cualquier otro sentido, se transforma en menos sensitivo a la respuesta después de una cierta duración de estímulo perturbador. Puede decirse que el oído se adapta gradualmente a las condiciones normales anteriores a la causa que lo excitó.

Por otra parte, si es estimulado excesivamente, ocurre que el período de descanso requerido antes de que retorne a las condiciones normales es más largo de lo habitual; se dice entonces que el órgano está fatigado.

La diferencia entre estos dos conceptos, adaptación y fatiga, es difícil de establecer. Sin embargo, puede establecerse que después de cesar el estímulo excitador transcurre un período de tiempo durante el cual la sensibilidad del receptor está por debajo del nivel normal de audición. Si transcurrido un período llamado crítico esta pérdida de sensibilidad permanece, puede considerarse que existe fatiga.

En el oído, esta fatiga acústica se manifiesta por la elevación del umbral de audición (siendo este el nivel de sonido más bajo que puede una persona oír) y se dice que existe un Desplazamiento Temporal del Umbral (DTU).

Si esta recuperación se prolonga, por lo menos, más de cuarenta horas se dice que existe un desplazamiento persistente del umbral, mientras que se esta recuperación no se produce se dice que existe un Desplazamiento Permanente del Umbral (DPU), existiendo entonces una sordera producida por ruido. Este proceso puede también ser más rápido, obteniéndose un DPU por una exposición de corta duración pero de elevado nivel de presión sonora, y entonces se habla de Trauma Acústico. Este trauma se produce en explosiones, disparos, etc.

Actualmente se conoce que casi cualquier ruido produce una alteración en el umbral de audición, y esta durará, dependiendo de la naturaleza del ruido, el tiempo de exposición y de la susceptibilidad del individuo, por un período que puede ser segundos, horas, días, etc.

3.2.2 DESPLAZAMIENTO TEMPORAL DEL UMBRAL DE AUDICIÓN (DTU)

La Organización Internacional de Normalización (ISO) define el DTU como “una elevación del nivel del umbral auditivo, a raíz de una exposición al ruido, en la que se aprecia un retorno progresivo al nivel anterior a la exposición, con recuperación total en menos de diez días”.

Por estudios realizados se sabe que tanto el valor de DTU producido como la frecuencia a la que se manifiesta y el tiempo de recuperación son función del nivel, de la duración de exposición y de la frecuencia del ruido. Sin embargo, es muy difícil de establecer una relación única, ya que a las diversas variables citadas anteriores hay que añadir la susceptibilidad del individuo.

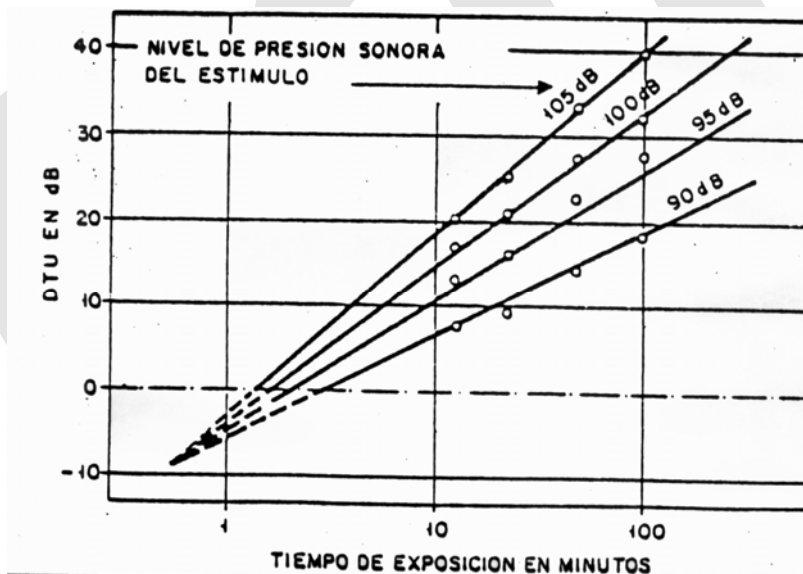
Las características del DTU son:

- La variación con el tiempo de exposición para tonos puros es logarítmica, según la expresión

$$DTU = K \log t \quad (3.1)$$

donde K es una constante que depende, entre otros factores, del nivel de presión sonora de la excitación, y t es el tiempo de exposición Figura 3.4.

FIGURA 3.4 VARIACIÓN DEL DUT A 4 KHZ CON EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN



- El DTU, para tonos puros, se incrementa al aumentar el nivel de presión sonora de la excitación, primero de manera uniforme, pero al llegar a un nivel crítico de presión sonora este aumento es muy rápido.
- Para ruidos de banda estrecha o tonos puros y niveles altos de exposición, el DTU se manifiesta en una frecuencia localizada media octava por encima de la frecuencia del estímulo.

- Para ruidos de banda ancha, es en la región comprendida entre 3 y 6 KHz donde se manifiesta el DTU, especialmente en la banda de octava centralizada en 4 KHz.
- Los ruidos de banda ancha producen menor DTU que los tonos puros.
- Las altas frecuencias producen mayores DTU
- Los ruidos intermitentes producen menor DTU que los ruidos continuos de la misma energía.
- La recuperación del umbral de audición tras un DTU depende del valor de la pérdida inicial, pudiendo establecerse que el desplazamiento remanente del umbral, es proporcional al tiempo transcurrido desde que cesó la excitación. Sin embargo, para DTU mayores que 50 dB existe un cierto retraso y el proceso de recuperación es logarítmico en el tiempo, para ser lineal después de las primeras quince-veinte horas.

3.2.3 DESPLAZAMIENTO PERMANENTE DEL UMBRAL DE AUDICIÓN (DPU)

Es evidente que cada persona tendrá una susceptibilidad para el ruido y, por tanto, presentará un límite de exposición compatible con la recuperación de la audición tras estar sometido a aquel; si este límite es excedido, el desplazamiento del umbral de audición será permanente (DPU) y se presentará una sordera. El proceso del paso DTU a DPU no está claramente definido, pero se puede decir que un excesivo DTU conducirá, en la mayor parte de los casos, a un DPU.

La existencia de un DPU puede no ser notado en un principio por el individuo o puede considerarlo como una pérdida de audición debida a la edad (presbiacusia).

La existencia de un DPU se pone de manifiesto por la presencia de pitidos en los oídos y por la torpeza en escuchar; así, los sonidos de alta frecuencia y baja intensidad (las constantes) se pierden, mientras las vocales, de baja frecuencia y alta intensidad, se siguen oyendo. Al llevar las consonantes la mayor parte de la información hablada, hay una pequeña reducción en volumen, pero el contenido se pierde. Al mismo tiempo, las voces femeninas, al ser de mayor frecuencia, son más difíciles de entender que las masculinas.

Los factores que determinan el DPU dependen, como en el caso de DTU, de la naturaleza del ruido (intensidad sonora y espectro), así como el tiempo de

exposición. Evidentemente, la susceptibilidad del individuo para el ruido es un factor importante en el DPU.

Las características del DPU son:

- Siendo constantes la duración de la exposición, las características físicas del ruido y la distribución en el tiempo de llegada al oído, se producirá mayor DPU cuanto mayor sea el nivel de presión sonora.
- Para ruidos de banda estrecha o tonos puros, el DPU se manifiesta en una frecuencia media octava superior a la frecuencia de excitación.
- Para ruidos de banda ancha, el DPU se presenta primeramente en la región de los 4 KHz (zona más sensible del oído) extendiéndose después, si la exposición se prolonga, a frecuencias superiores e inferiores.
- La relación entre el tiempo de exposición y el DPU que se produce varía de unas frecuencias a otras. Así, para 3 y 4 KHz, el máximo deterioro se presenta en los primeros diez - quince años de exposición.
- Respecto los ruidos intermitentes, parece ser que el DPU que producen es función únicamente de la energía acústica total que recibe el sujeto, independientemente del espectro del ruido y de la variación temporal de la exposición.
- El oído es más tolerante para las bajas frecuencias que para las frecuencias medias y altas; consecuencia de lo cual el nivel sonoro en dB (A) es un índice adecuado para la predicción del posible ruido y las características del tiempo de exposición.

3.2.4 RUIDOS DE IMPACTO E IMPULSO. TRAUMA ACÚSTICO

Se caracterizan los ruidos de impacto e impulsos por su corta duración y, consecuentemente, su rápido incremento del nivel de presión, y son producidos por el choque de sólidos (caso de impactos) o por la expansión brusca de gases (caso de impulsos), como son las explosiones, cañonazos, etc.

Los parámetros que definen un impulso son su presión máxima o presión pico, su duración, el tiempo de crecimiento, el contenido espectral y el número de repeticiones.

La exposición a este tipo de ruido, bien sea una serie de ellos o simplemente uno solo, causará una elevación del umbral de audición, que podrá ser DTU o DPU.

La presencia de un ruido de fondo continuo, no peligroso, sobre el que se intercalan impulsos, disminuye el DTU que producirían estos últimos si actuaran solos. Análogamente, la introducción de impulsos no peligrosos en un ambiente ruidoso peligroso hará disminuir el DTU causado por este último.

Para ruidos de este tipo parece ser que la causa de DPU es la energía total contenida en el impacto o impulso, más que la variación temporal de este, su frecuencia de repetición, etc.

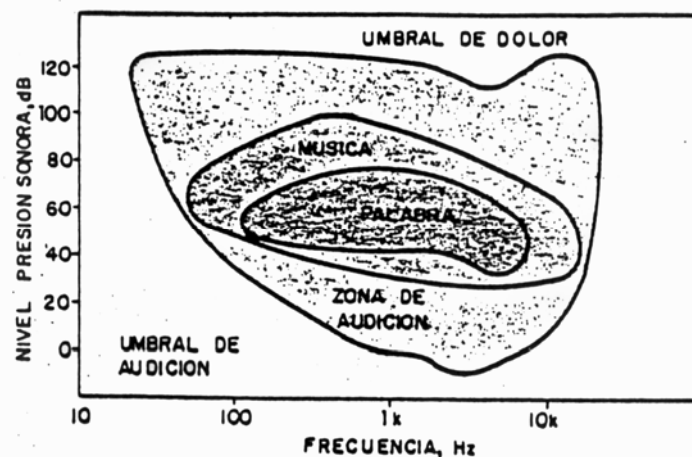
3.3 INTERFERENCIA CON LA COMUNICACIÓN HABLADA

Es evidente que la comunicación hablada constituye una parte importante de la actividad humana y que cualquier agente que disminuye la capacidad de comunicación entre individuos será considerado como nocivo psicológicamente.

La perfecta inteligibilidad de las palabras dichas por una persona o emitidas por aparatos de radio o TV será solo posible si la señal que le llega al oyente no está excesivamente deformada y tiene un nivel suficiente con respecto al ruido de fondo.

La conversación normal presenta variaciones apreciables de nivel, con un valor medio de 65 dB a distancia de un metro y oscilación de 20 dB. El rango de frecuencias importantes para la percepción de la palabra está comprendido entre 200 y 6.000 Hz (Figura 3.5). En términos generales, se puede decir que las frecuencias importantes para las vocales son las inferiores a 1.500 Hz, mientras que para las consonantes lo son las superiores a esta frecuencia.

FIGURA 3.5 ÁREAS DE AUDICIÓN



En la Figura 3.6 se muestran los espectros típicos de la voz para hombres y mujeres. Es importante resaltar el hecho que si bien el máximo de energía acústica se presenta en las frecuencias medias (400 – 800 Hz), son las frecuencias comprendidas entre 1.000 – 4.000 Hz las que tienen mayor contribución en la inteligibilidad de la palabra (Tabla 3.2) dado que son las propias de las consonantes.

FIGURA 3.6 ESPECTROS TÍPICOS DE LA VOZ HUMANA

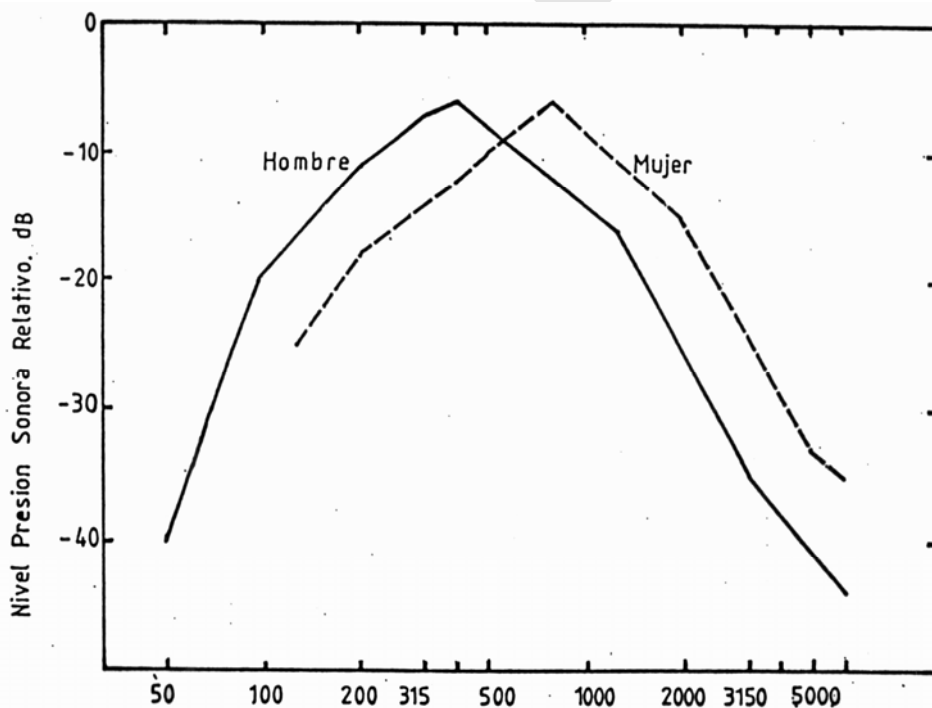


TABLA 3.2

IMPORTANCIA RELATIVA DE LAS DIVERSAS FRECUENCIAS EN LA CONVERSACIÓN

BANDA FRECUENCIA HZ	IMPORTANCIA
63 – 200	Insignificante
200 – 400	Pequeña
400 – 800	Moderada
800 – 2.000	Máxima
2.000 – 4.000	Casi máxima

El efecto del ruido de fondo es el de elevar el umbral de audición, ejerciendo, consecuentemente, un enmascaramiento de los sonidos deseados, que son desfigurados y deformados. Para compensar este efecto debe elevarse el nivel de la voz, con el consiguiente esfuerzo, molestia y cansancio, o aproximarse los interlocutores.

En general, puede establecerse que el grado de interferencia con la conversación producido por un ruido, depende fundamentalmente del nivel sonoro de éste y de la distancia entre interlocutores, pudiendo también influir el ambiente físico en que se encuentran los interlocutores, el tipo de ruido, la familiaridad con el orador, el conocimiento del lenguaje y del tema, etc.

Los ruidos continuos producen una mayor interferencia que los ruidos discontinuos, pues en este último caso, aunque algunas de las sílabas o palabras de una conversación queden deformadas o incluso totalmente enmascaradas, el sentido global de la frase se puede completar por otras expresiones, por el gesto, lectura de labios, etc.

Un método sencillo para la evaluación de la interferencia del ruido con la palabra se basa en la utilización del Nivel de Interferencia de la Palabra, SIL (Speech Interference Level). En base al rango de frecuencias donde está comprendida la mayor parte de la energía de la palabra, el SIL es la media aritmética de los niveles de presión sonora del ruido correspondientes a las bandas de octava centradas en 500, 1.000 y 2.000 Hz; esto es:

$$SIL = 1/3 (NPS_{500} + NPS_{1000} + NPS_{2000}) \quad (3.2)$$

donde el NPS es el nivel de presión sonora del ruido en cada una de las bandas de frecuencia consideradas.

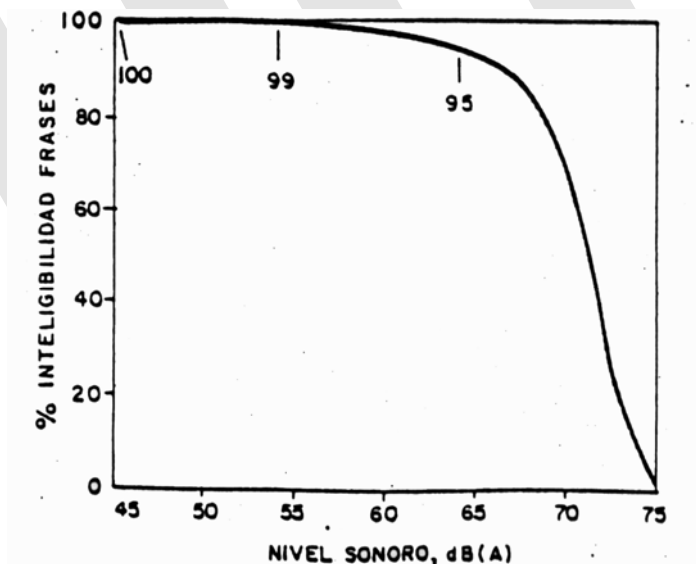
Los valores así obtenidos pueden compararse con la Tabla 3.III, que muestran los niveles del ruido que permiten una conversación aceptable en función de la distancia y niveles de voz.

La interferencia del ruido de fondo en la conversación puede conocerse usando el concepto de porcentaje de inteligibilidad, definido como la relación, en una conversación normal, entre las palabras entendidas y aquellas que no lo han sido. Tras diversos estudios realizados se ha podido establecer la curva de la Figura 3.7 que muestra el porcentaje de inteligibilidad en función del nivel de ruido de fondo presente en dB(A) en espacios cerrados típicos con, aproximadamente, una absorción acústica de 300 sabines (Punto 2.6.2).

TABLA 3.3
NIVELES DE INTERFERENCIA DE LA PALABRA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA

DISTANCIA ENTRE INTERLOCUTORES	NIVELES DE INTERFERENCIA DE LA PALABRA (dB)			
	NORMAL	VOZ ALTA	VOZ MUY ALTA	GRITANDO
0,15	76	82	88	94
0,3	70	76	82	88
0,6	64	70	76	82
0,9	60	66	72	78
1,2	58	64	70	76
1,5	56	62	68	74
1,8	54	60	66	72
3,6	48	54	60	66

FIGURA 3.7 PORCENTAJE DE INTELIGIBILIDAD EN INTERIORES EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE RUIDO DE FONDO



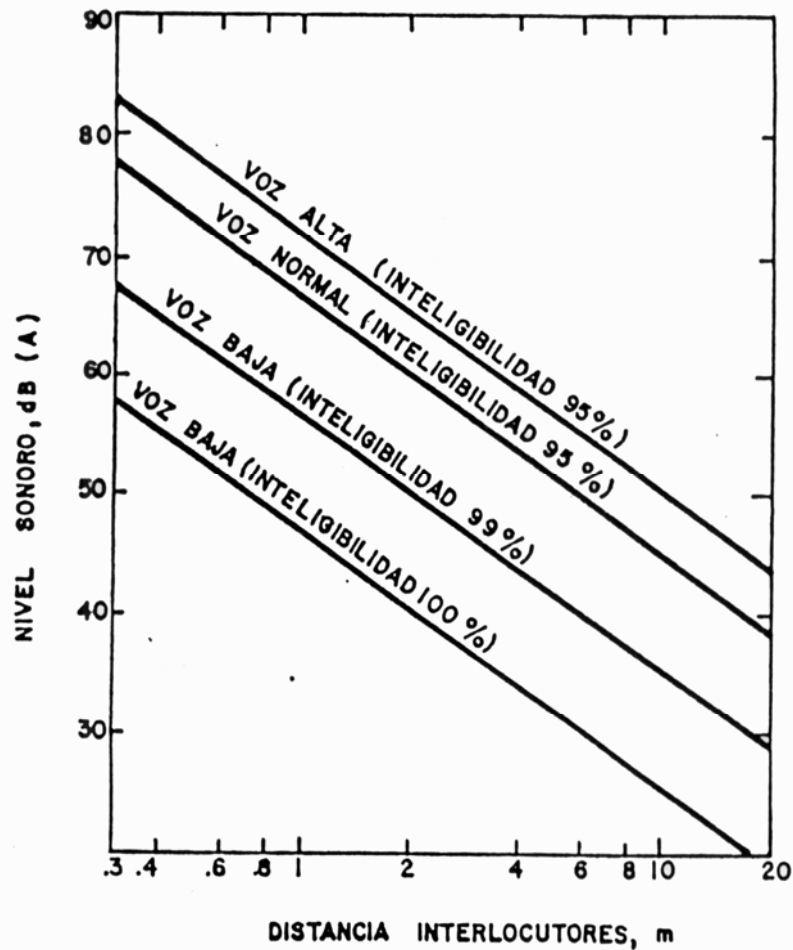
En ambientes exteriores, donde existe una disminución de 6 dB por doble de distancia (campo libre), se produce que a partir de una determinada separación entre

los interlocutores, el nivel de la voz sea enmascarado por el ruido de fondo existente.

En la Figura 3.8 se presenta, en función del nivel de ruido de fondo y para distintos grados de esfuerzo vocal, la distancia que deberá existir entre los interlocutores a fin de poder mantener una conversación satisfactoria (inteligibilidad de la palabra superior al 95%).

FIGURA 3.8

DISTANCIA MÁXIMA ENTRE INTERLOCUTORES QUE PERMITE UNA CONVERSACIÓN SATISFACTORIA EN FUNCIÓN DEL RUIDO DE FONDO, EN EL EXTERIOR DE LAS VIVIENDAS



3.4 INTERFERENCIA CON EL DESCANSO Y EL SUEÑO

El ruido puede afectar el descanso de un individuo impidiéndole dormirse, alterando su sueño o bien despertándolo.

Es evidente que el hombre necesita dormir y descansar por motivos de salud y que modificaciones prolongadas en sus hábitos de descanso repercutirán en ella. No obstante, hay que considerar el gran poder de adaptación del hombre al medio que le rodea, pudiéndose acostumbrar a dormir bajo niveles sonoros que le impidieron hacerlo en un principio, e incluso es posible que la ausencia del ruido habitual sea causa de no poder conciliar el sueño.

Evidentemente, ni todos los individuos se despiertan con el mismo nivel de ruido ni un mismo individuo lo hace al mismo nivel, dependiendo del estado de profundidad del sueño en que se encuentra, de su estado psíquico, etc.

Los diferentes estudios realizados a fin de establecer la interferencia del ruido con el descanso, permiten establecer las siguientes consideraciones generales:

- Niveles sonoros inferiores a 25 dB(A) no producen interferencias con el descanso y el sueño.
- La calidad del sueño disminuye a partir de niveles sonoros equivalentes superiores a 35 – 40 dB(A). Cuando el ruido alcanza 50 dB(A), será necesario que transcurra un cierto tiempo (que puede llegar a superar una hora) para poder conciliar el sueño.
- La profundidad del sueño se modifica en función del nivel máximo para ruidos intermitentes o de impacto; así se ha podido establecer que el 50% de la población modifica su estado de sueño cuando el nivel pico es 60 dB(A), mientras que si éste aumenta hasta 90 dB(A), es prácticamente la totalidad de la población la que presenta alteraciones.
- La duración del ruido intrusivo es importante; así incrementos súbitos de hasta 10 dB del nivel de ruido de fondo con duraciones inferiores a 0.5 segundos modifican el estado de sueño.
- El porcentaje de población perturbada por el ruido ambiental de fondo aumenta con el nivel sonoro de éste. En la Tabla 3.4 se muestra dicho porcentaje en función del nivel equivalente en el exterior de las viviendas.

- Los umbrales de modificación del estado de sueño y de despertar pueden establecerse en 35 dB(A) y 60 dB(A) respectivamente.

**TABLA 3.4 OPINIONES DE LA COMUNIDAD FRENTE AL RUIDO
(PRINCIPALMENTE RUIDO NOCTURNO)**

NIVEL EQUIVALENTE EXTERIOR dB (A)	NIVEL EQUIVALENTE INTERIOR dB (A)*	PORCENTAJE		
		MUY PERTURBADOS	IMPIDE DORMIRSE	DESPIERTA
75	65	70	55	70
70 – 75	60 – 65	70	50 – 55	68 – 70
65 – 70	55 – 60	70	45 – 50	62 – 65
60 – 65	50 – 55	70	35 – 40	55 – 62
55 – 60	45 – 50	70	30 – 35	50 – 55
50 – 55	40 – 45	56	25 – 30	42 – 50
45 – 50	35 – 40	36	15 – 20	---

* Ventanas abiertas

Además del nivel de ruido, existen otros aspectos de este que intervienen en el mecanismo de interferencia en el sueño, como son su contenido informativo y las intermitencias de éste.

Los sonidos que tienen un significado especial para el durmiente pueden despertarle a niveles no excesivamente elevados; tal es el caso del lloro de un niño a su madre o la pronunciación del nombre propio de la persona dormida. Por el contrario, aquellos sonidos familiares y sobre los que no se puede ejercer acción alguna no interfieren en el sueño; por ejemplo, el ruido de las instalaciones de aire acondicionado.

Los sonidos que se presentan de forma intermitente o distribuidos irregularmente durante el período de descanso, afectan al durmiente de manera especial; tal es el caso del ruido producido por aeronaves, trenes, etc.

Los efectos en el hombre debidos a la perturbación del sueño por ruido son cansancio, irritabilidad, deseos de dormir, etc. No se tiene evidencia de que estos afectos puedan ser perjudiciales para el hombre, tanto en su salud físi-

ca como mental; sin embargo, si que influyen en su comportamiento, creando, en general, un resentimiento contra la fuente sonora molesta.

3.5 EFECTOS SOBRE EL TRABAJO

El conocimiento y evaluación de los efectos del ruido en las actividades laborales o profesionales es muy complejo de realizar por la gran cantidad de variables que intervienen y los enmascaran.

Es difícil demostrar que el ruido produzca efectos prolongados sobre el rendimiento y eficacia en el trabajo; sin embargo, hay que suponer que ejerce cierta influencia, ya que puede ser causa de molestia, accidentes, dificultades de comunicación, distracciones, etc.

Por otra parte, la capacidad de adaptación del hombre tiende a suprimir todo efecto permanente, si bien es posible que al principio sufra una merma en el rendimiento mental y muscular, pero este se recupera rápidamente.

Los estudios realizados, tanto en el laboratorio como in situ, presentan resultados muchas veces contradictorios. En particular, aquellos en los que se cuente con la participación de los trabajadores se ven enmascarados por la actitud de estos al sentirse observados.

De forma general se puede indicar que la interferencia del ruido en el rendimiento laboral varía de unos sujetos a otros, dependiendo de la actitud del individuo, naturaleza del ruido, cantidad de información que este contenga el ruido intrusivo, estado físico del operario, etc. No todos los tipos de trabajo serán igualmente perturbados; así, aquellos que requieran mayor concentración por ejemplo, los trabajos mentales serán más afectados que aquellos meramente sencillos o rutinarios.

3.6 MOLESTIA

De los efectos del ruido en el hombre, el más extendido es la molestia, entendida esta como una sensación de desagrado o una actitud adversa contra un determinado factor ambiental, del cual el ser humano sabe o cree que puede afectar negativamente su salud o bienestar. Consecuentemente, será la molestia la magnitud que mida la reacción de la comunidad frente al ruido.

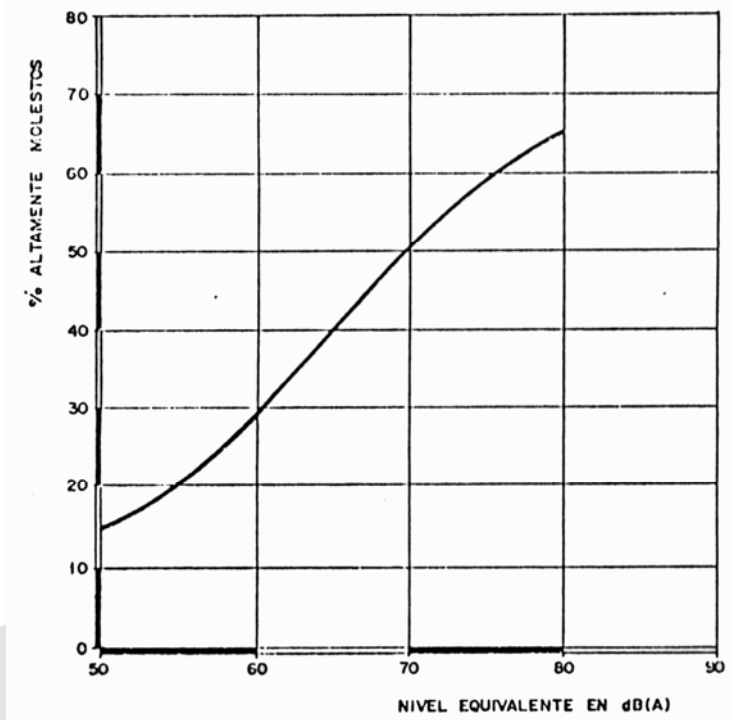
Siendo la molestia un efecto subjetivo, dependerá tanto de las características físicas del ruido como del estado de ánimo, edad, sensibilidad, nivel cultural del individuo, familiaridad con la fuente, etc.

En general, puede establecerse:

- La molestia aumenta con el nivel de ruido, así como con la sensibilidad del individuo.
- Las personas introvertidas son más fácilmente molestas que las extrovertidas.
- Son más molestas las altas frecuencias que las bajas y medias.
- Aquellos ruidos que presentan tonos puros fácilmente detectables y/o aquellos otros de carácter impulsivo son especialmente molestos.
- Los sonidos intermitentes son más molestos que los continuos del mismo nivel.
- La repetición de un sonido es más irritante a ritmo lento que a ritmo rápido.
- La familiaridad con la fuente sonora tiende a disminuir la molestia.
- La molestia es mayor en el hogar que fuera de él.
- Los ruidos con contenido tonal o de impulsos son más molestos que los ruidos continuos.

No hay métodos directos para la medida de la molestia; sin embargo, pueden obtenerse indicaciones a través de encuestas que muestren la actitud de los individuos. En la Figura 3.9 se presentan los porcentajes de población altamente molesta debido a los niveles de ruido ambiental.

FIGURA 3.9 RELACIÓN ENTRE LOS NIVELES SONOROS Y EL PORCENTAJE DE POBLACIÓN MOLESTA



Las encuestas realizadas muestran que, en general, es el ruido de los sistemas de transporte la principal fuente de molestia, tanto en el interior de las viviendas como el exterior, destacándose, principalmente, el ruido producido por el tráfico rodado, con áreas de influencia mucho mayores que las zonas de influencia del ruido de aeronaves y ferrocarriles. En el trabajo, será el ruido producido por la propia actividad la fuente de molestia dominante, y que también podrá serlo para aquellas viviendas que se encuentre cerca de las industrias ruidosas. Otras fuentes de molestia serán los ruidos producidos por la propia comunidad y por las actividades de ocio.

3.7 EFECTOS DIRECTOS SOBRE LA SALUD

La Organización Mundial de la Salud define la salud como “un estado de completo bienestar físico mental y social y no meramente una ausencia de una enfermedad y dolencia”. Según esto, los aspectos anteriormente descritos entran en la definición como falta de salud; sin embargo, de forma más simple, puede entenderse como efectos del ruido en la salud como aquellos que afectan los aspectos físicos y mentales del individuo.

Respecto a la salud física, el efecto de ruido es semejante a los asociados con el miedo y la tensión; así, existe aumento en el número de pulsaciones, modificación del ritmo respiratorio, de la presión arterial, de la tensión muscular, de la resistencia de la piel, de la agudeza de visión, de la vasoconstricción periférica, etc. Todos estos efectos desaparecen un cierto tiempo después de cesar la exposición al ruido.

Los efectos del ruido en la salud mental de los individuos expuestos a él, comprenden la posibilidad de presentar síntomas de nerviosismo o trastornos mentales. No existe hasta el momento clara evidencia de que el ruido pueda afectar de forma directa la salud mental de los sujetos sometidos a él; sin embargo, parece existir mayor posibilidad de enfermedades mentales en la población expuesta al ruido de aeronaves en las proximidades de los aeropuertos.

3.8 RESPUESTA DE LA COMUNIDAD AL RUIDO AMBIENTAL

El nivel sonoro ambiental varía ampliamente, tanto en magnitud como en carácter, de unos escenarios a otros; así no se alcanzarán los mismos niveles en una zona residencial con viviendas unifamiliares que en una zona suburbana industrial.

Por otro parte, dentro de cada escenario particular, el nivel de ruido variará a lo largo del día siguiendo los grados de actividad de la comunidad, es decir, los niveles de ruido durante el período nocturno serán menores que durante el período diurno. Además las actividades que la comunidad que se desarrollan en cada situación y que se ven perturbadas por el ruido son muy diversas.

Todo esto origina que para conocer la respuesta de la comunidad frente al ruido se requieran gran número de datos, precisando en la mayoría de las situaciones expresarse la información obtenida en forma estadística. En general los métodos que se emplean para conocer dicha respuesta son:

- La actitud tomada frente al ruido, manifestada en quejas, demandas, pleitos, etc.
- La respuesta a encuestas, cuestionarios, etc.

En ambos casos será la molestia la magnitud que medirá la respuesta comunitaria.

A través de los diversos estudios realizados, se ha podido establecer que la respuesta de la comunidad es función de diversos factores: unos son función

de las características físicas de la fuente, otros son función de la propia comunidad.

Las características de la fuente sonora son: el nivel sonoro, el espectro sonoro, la presencia de tonos puros fácilmente detectables, los sonidos con frecuencias discretas, los picos de sobrepresión en los ruidos de impactos e impulsos, el tiempo de operación (por ejemplo, si es de día o de noche), las fluctuaciones o cambios rápidos de nivel de ruido, etc.

Entre los factores propios de la comunidad pueden citarse: el nivel social y económico de sus componentes, la educación, el interés o conocimiento de la fuente sonora, complacencia en la zona y tiempo de permanencia en ella, la experiencia previa de la comunidad a una exposición análoga al ruido problema, la facilidad de visión e identificación de las fuentes sonoras, la depreciación de un área por la instalación de una fuente sonora, etc.

Como resumen de los mencionados estudios se estableció una relación entre el nivel sonoro día/noche y los diversos grados de molestia que originaba dicho nivel sobre la población expuesta (Figura 3.10); así como el porcentaje de población altamente molesta por ruido con el nivel de éste (Figura 3.11).

FIGURA 3.10
RELACIÓN ENTRE EL NIVEL SONORO AMBIENTAL Y LOS GRADOS DE MOLESTIA

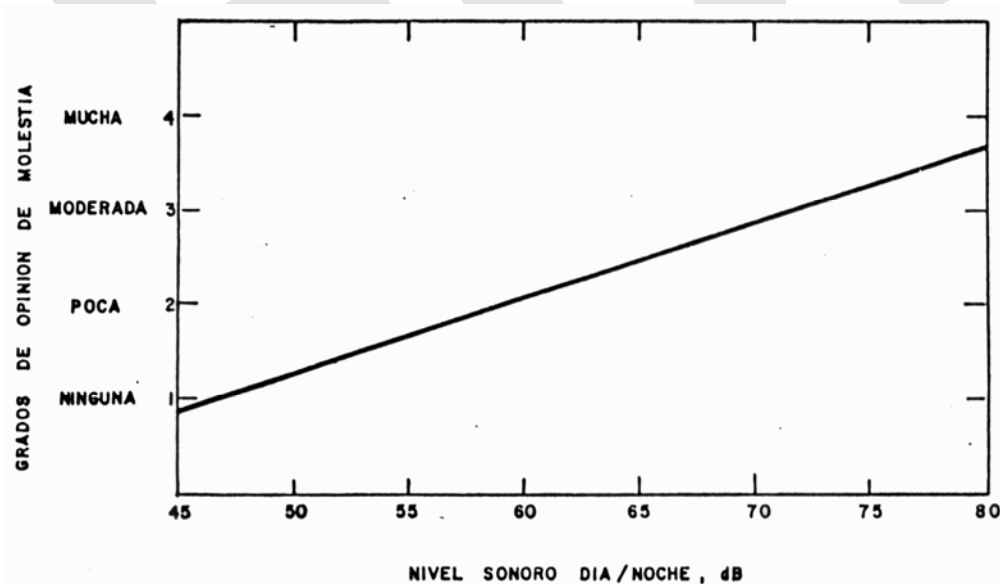
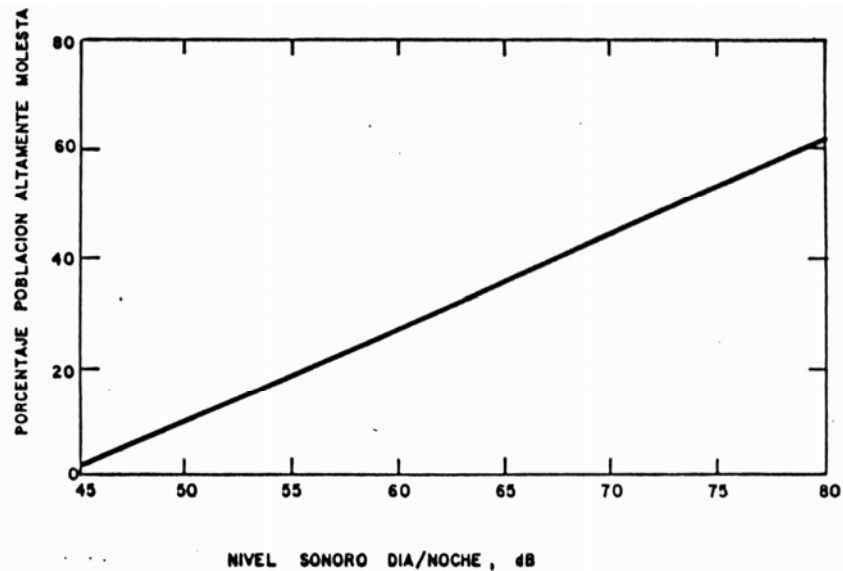


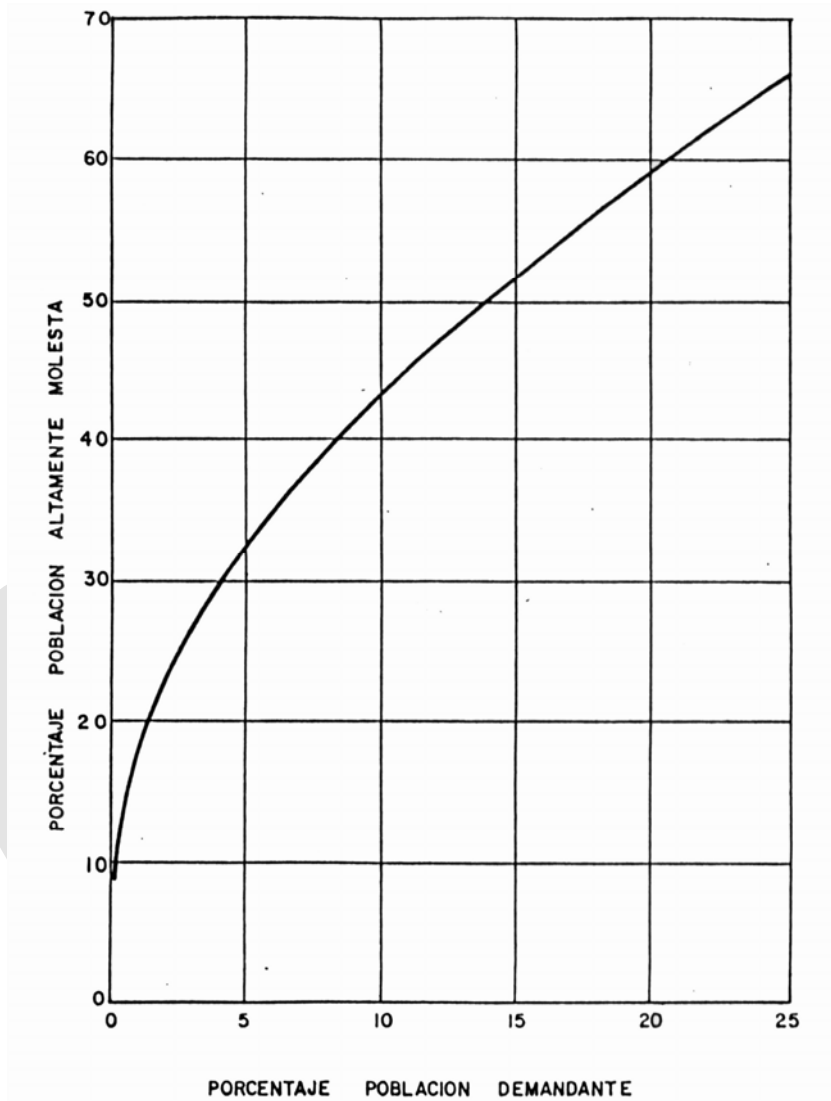
FIGURA 3.11 RELACIÓN ENTRE EL NIVEL SONORO AMBIENTAL Y PORCENTAJE DE POBLACIÓN MOLESTA



Puede observarse que para niveles sonoros día/noche en el exterior de las viviendas inferiores a 45 dB(A), el grado de molestia originado por el ruido es mínimo, así como el porcentaje de población altamente molesta. Aumentando el nivel hasta 55 dB(A), el grado de molestia es pequeño y el porcentaje de población altamente perturbada (aproximadamente 20%) está dentro del grupo de individuos especialmente sensibles al ruido. Para un nivel de 60 dB(A) prácticamente la tercera parte de la población sufre una molestia alta.

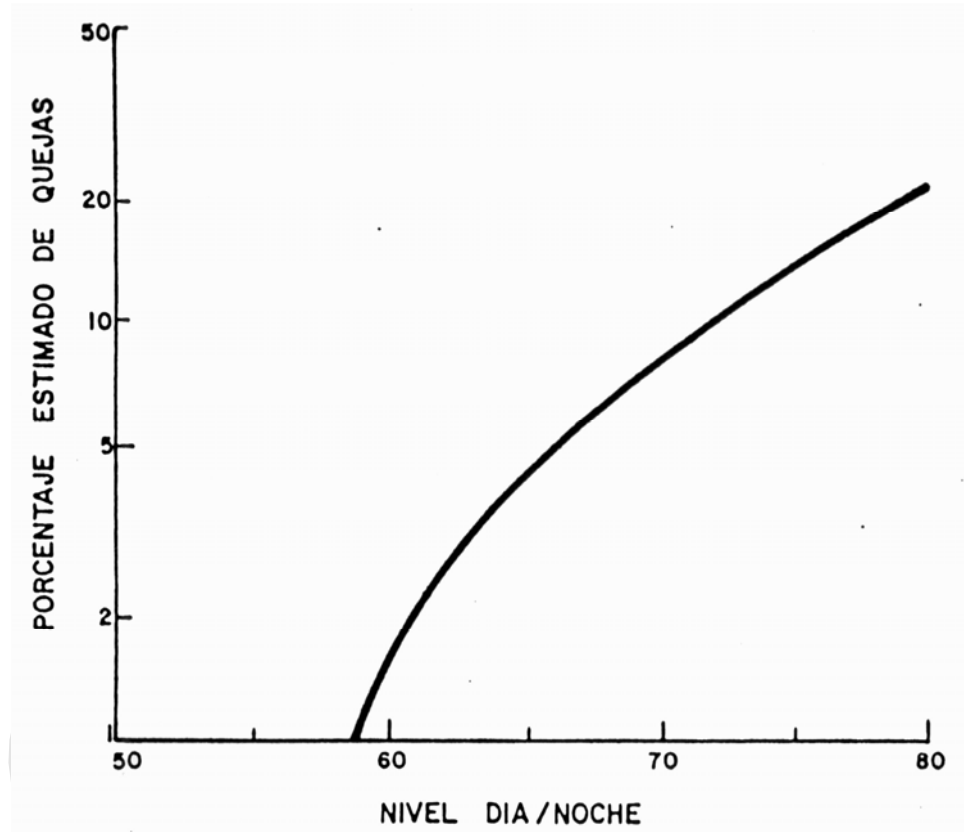
La relación que existe entre los porcentajes de individuos que presentan reclamaciones y quejas por ruido y los que están altamente molestos, está dada en la Figura 3.12. En donde se indica que cuando hay un 1% de quejas, el 17% de la población está altamente molesta y cuando existe un 10% de quejas, la población molesta es el 43%.

FIGURA 3.12 RELACIÓN ENTRE LOS PORCENTAJES DE POBLACIONES ALTAMENTE MOLESTAS Y QUE PRESENTAN RECLAMACIONES



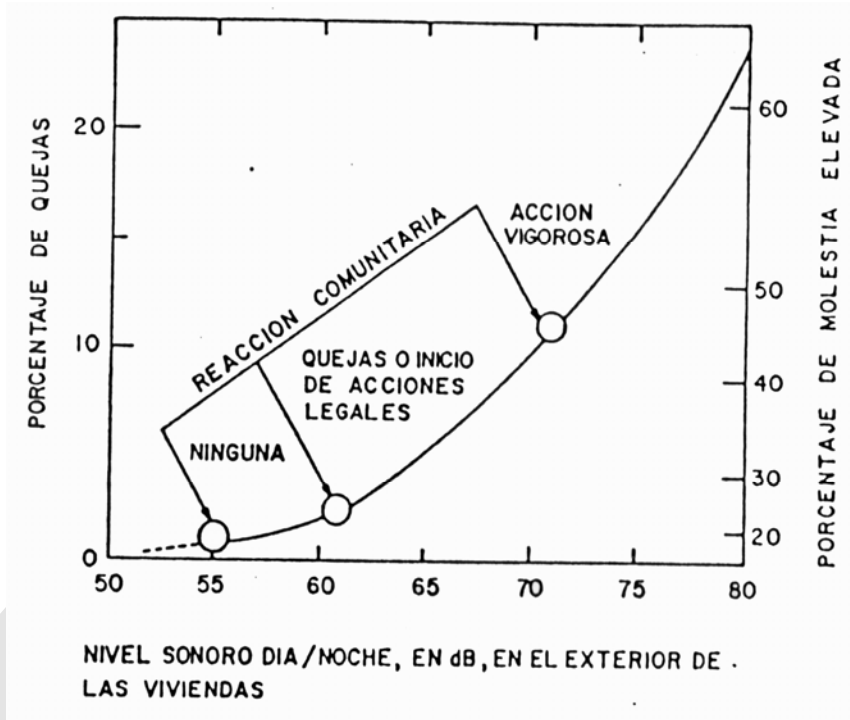
El porcentaje de quejas en función del nivel día/noche se presenta en la Figura 3.13. El porcentaje de quejas será mínimo para niveles sonoros día/noche inferiores a 60 dB(A); aumentando hasta 5%, 10% y 20% cuando el nivel alcanza respectivamente 65 dB(A), 70 dB(A) y 80 dB(A).

FIGURA 3.13 RELACIÓN ENTRE EL NIVEL SONORO AMBIENTAL Y EL PORCENTAJE DE QUEJAS QUE ORIGINA



Finalmente, un resumen de todo lo anterior se presenta en la Figura 3.14. Estos resultados indican que un nivel sonoro día/noche de valor 55 dB(A) en el exterior de las viviendas producirá gran molestia en el 17% de la población, si bien el número de quejas será inferior al 1% y el ruido será un factor poco relevante para la comunidad y consecuentemente no habrá reacción comunitaria. Si el nivel es 60 dB(A), el 23% de la población estará molesta esperando un 2% de quejas, existiendo alguna reacción comunitaria. Finalmente si el nivel es 65 dB(A), se producirá 5% de quejas, el 33 de la población estará altamente molesta y deberá esperarse fuerte reacción comunitaria.

FIGURA 3.14 RELACIÓN ENTRE EL NIVEL SONORO AMBIENTAL Y LOS PORCENTAJES DE POBLACIÓN ALTAMENTE MOLESTA Y DE QUEJAS PRESENTADAS



4 CONTROL DEL RUIDO EN LA INDUSTRIA

4.1 INTRODUCCIÓN

El ruido es un producto secundario en numerosos procesos y actividades industriales que, una vez generado, es transmitido a través de un medio elástico (generalmente el aire) hasta alcanzar el receptor. La respuesta de este receptor, considerado individualmente o como parte integrante de una comunidad, señalará los valores límites permisibles de ruido en cada situación particular, e indicará las acciones de control encaminadas a conseguir dichos límites.

El efecto más importante del ruido en el hombre es la pérdida de audición permanente que puede experimentar como consecuencia de exposiciones prolongadas a niveles elevados. La legislación existente en materia de ruido industrial trata de disminuir el riesgo de que ese produzca una pérdida de audición en los individuos expuestos a él.

Otros efectos del ruido en el hombre son molestia, interferencia con la comunicación hablada, posibles modificaciones en el rendimiento y eficacia, etc. (Capítulo 3).

4.2 ACCIONES DE CONTROL

Los aspectos a considerar en el planteamiento de una acción de control de ruido en una instalación industrial contemplan:

- Acción sobre fuente sonora

Siendo este método el más directo para la reducción de los niveles sonoros emitidos por las distintas fuentes, en la práctica es la más difícil de aplicar por la necesidad de conocer los principios físicos y mecánicos de funcionamiento de los diversos elementos que generan el ruido; sus vías de transmisión, a través de la estructura de la fuente, una vez originados y, finalmente, las características de las superficies de esta que lo radian al medio ambiente circundante.

Las soluciones generales de control en la fuente son:

- Reducir las fuerzas de impactos o impulsos
- Reducir las fuerzas de fricción
- Incrementar el amortiguamiento
- Reducir las vibraciones
- Alterar las frecuencias de resonancia
- Minimizar o eliminar el balanceo de masas
- Modificar las condiciones aerodinámicas de la fuente sonora
- Etc.

La complejidad de muchas de estas soluciones hace que esta acción se realice en programas de investigación en ingeniería de diseño.

Otras posibles acciones sobre la fuente sonora, menos complicadas, comprenden el desplazamiento de estas y/o su reemplazamiento por otras menos ruidosas.

▪ Acción sobre la propagación

Esta solución es quizá la más práctica en la mayoría de las situaciones, siendo, por lo tanto, la más empleada, independientemente de que se puedan, además, realizar acciones sobre la fuente o sobre el receptor.

Las acciones de control sobre la propagación comprenden:

- Empleo de barreras acústicas
- Colocación de material absorbente
- Uso de cerramientos
- Instalación de atenuadores o silenciadores

El conocimiento de las características de las fuentes definidas anteriormente y las vías de propagación de las ondas sonoras, permiten hacer predicciones, en la mayor parte de las situaciones, de los niveles sonoros esperados con bastante exactitud y, consecuentemente, ejercer acciones de control aun desde el estado de proyecto, antes de que el problema este presente.

▪ Acción sobre el receptor

Esta acción de protección personal incluye:

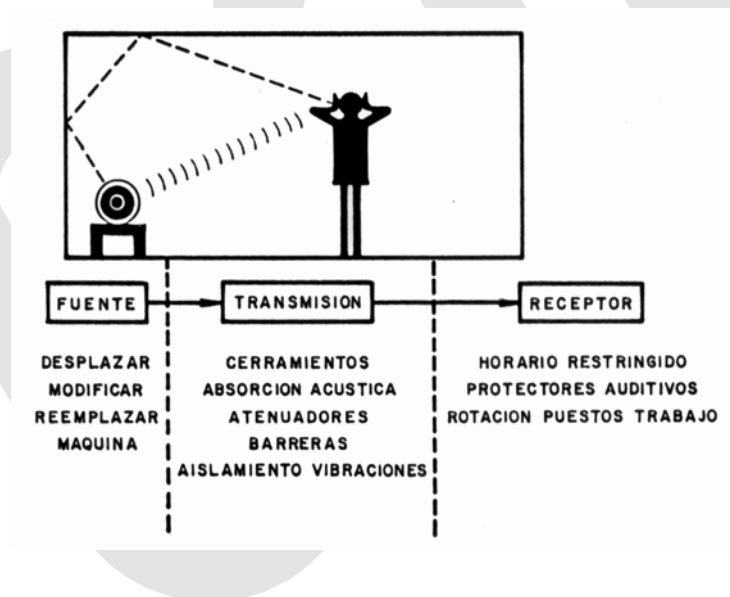
- Uso de protectores auditivos
- Horario restrictivo
- Rotación de los puestos de trabajo

Las dificultades que pueden originar algunas de estas soluciones, así como la poca aceptación por parte del receptor del uso de los elementos de protección personal aconseja no recurrir a ellas, salvo en casos muy aislados o particulares (en calderería, por ejemplo).

Estas posibles acciones marcan las competencias y responsabilidades de los diversos sectores preocupados en los problemas de control de ruidos. Serán los fabricantes los responsables de obtener equipos y procesos menos ruidosos mediante las oportunas modificaciones en las fuentes sonoras, incorporación de nuevas tecnologías, etc. La acción en la transmisión será competencia de ingenieros y arquitectos. El control sobre el receptor se empleará como último recurso por los técnicos en seguridad e higiene en el trabajo.

Todas las acciones de control indicadas anteriormente están señaladas de forma esquemática en la Figura 4.1.

FIGURA 4.1 SISTEMAS DE CONTROL DE RUIDO



4.3 DESPLAZAMIENTO DE LA FUENTE SONORA

La forma más sencilla de conseguir una reducción del nivel sonoro existente en un determinado punto, es alejar de él la fuente sonora que origina dicho nivel. Sin embargo, esta solución no es factible en muchas situaciones, bien sea por falta de espacio, por razones económicas, etc.

Tal y como se indicó en el Capítulo 2, a partir de una cierta distancia a una fuente sonora cualquiera, esta puede considerarse como puntual y el nivel de presión sonora en condiciones de campo libre, está dado por la expresión:

$$NPS = NWS - DI - 20 \log r - A - 11 \quad (4.1)$$

donde: NPS = nivel de presión sonora en el punto situado en la dirección, a la distancia r de la fuente.

NWS = nivel de potencia sonora de la fuente.

DI = índice de direccionalidad de la fuente (en el caso de no direccionalidad y para radiación hemisférica, $DI = 3$).

r = distancia del punto considerado a la fuente.

A = atenuación debida a las condiciones ambientales.

La ecuación anterior permite establecer la variación de los niveles de presión sonora NPS_1 y NPS_2 en dos puntos situados en la misma dirección y a distancias r_1 y r_2 cortas de la fuente:

$$NPS_2 = NPS_1 - 20 \log r_2 / r_1 \quad (4.2)$$

Esto representa una variación de 6 decibelios cada vez que se dobla la distancia a la fuente. En la práctica, este valor teórico se ve modificado:

- En espacios abiertos, por las atenuaciones debidas a la vegetación, etc.; consecuentemente, debe esperarse un valor superior al teórico para la variación del nivel de presión sonora con la distancia.
- En recintos cerrados, por las condiciones de contorno; así, la presencia de paredes no tratadas acústicamente da lugar que las ondas sonoras se reflejan sucesivamente, originando que el nivel de presión sonora aumente en puntos alejados de la fuente y que se mantenga prácticamente constante al variar la distancia.

La disminución del nivel de presión sonora con la distancia se aproximará tanto más al valor teórico (6 dB/doble distancia) cuanto mayor sea la absorción acústica existe en el interior del recinto.

4.4 SUSTITUCIÓN DE LAS FUENTES SONORAS

El reemplazamiento de una fuente sonora por otra menos ruidosa es una solución sencilla y efectiva de control de ruido; no obstante, y por razones eco-

nómicas principalmente, es difícil de realizar en la mayor parte de las soluciones en instalaciones industriales ya existentes.

Sin embargo, en las nuevas instalaciones, esta solución es sencilla de aplicar, ya que en la etapa de diseño se puede seleccionar los equipos y procesos menos ruidosos.

4.5 BARRERAS ACÚSTICAS

Constituyen barreras acústicas aquellas superficies sólidas que se interponen en la marcha de las ondas sonoras impidiendo la propagación de estas y creando una zona silenciosa llamada “sombra acústica” (Figura 2.8).

La atenuación de una barrera no es función única de sus dimensiones, sino que también depende de las distancias relativas del observador y de la fuente a la barrera y es debida a la difracción que sufren las ondas sonoras al alcanzar los bordes de la misma.

Una extrapolación de la teoría de Fresnel sobre la difracción óptica permite la obtención de una expresión matemática para el cálculo de la atenuación L que presentan las barreras acústicas para fuentes puntuales:

$$L = 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{Th\sqrt{2\pi N}} + 5 \quad (4.3)$$

estando el número de Fresnel N definido por:

$$N = \frac{2}{\lambda} (A+B-d) \quad (4.4)$$

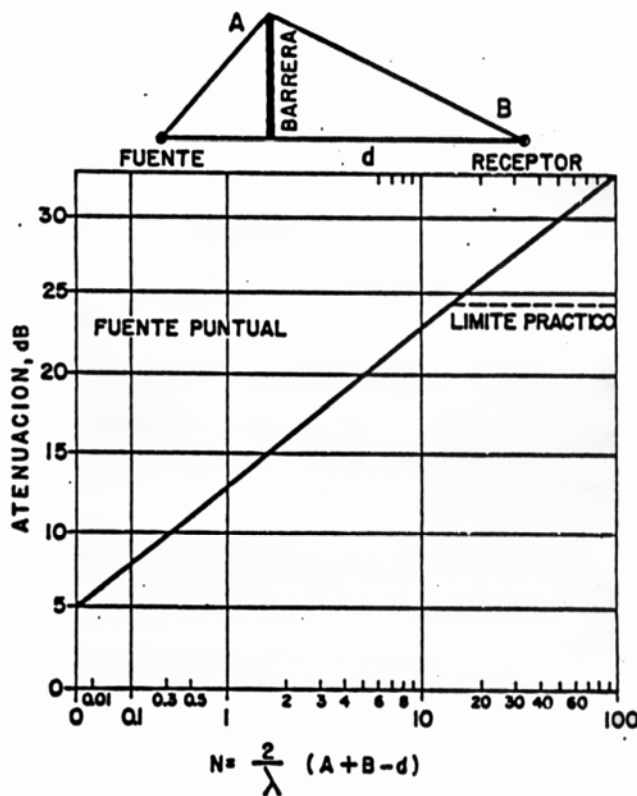
donde: λ = longitud de onda del sonido incidente, en m

d = distancia de la fuente sonora al receptor, en m

$A+B$ = distancia mínima que recorre la onda sonora desde la fuente al receptor, en metros

La Figura 4.2 muestra la representación gráfica de la atenuación L dada por la ecuación anterior en función del número de Fresnel. El límite inferior, aproximadamente 5 dB, se produce para las frecuencias muy bajas donde se presentan efectos de difracción o por la posición del observador, muy próximo a la línea de visión directa de la fuente sonora. El límite superior está determinado por las condiciones ambientales y ha sido experimentalmente establecido en 24 dB.

FIGURA 4.2 ATENUACIÓN DEL SONIDO DE UNA FUENTE PUNTUAL PRODUCIDA POR UNA BARRERA RÍGIDA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE FRESNEL



En el empleo de barreras acústicas debe tenerse en cuenta que:

- En ambientes semireverberantes su efecto solo es apreciable en zonas próximas a ellas, ya que solamente las ondas directas serán atenuadas, mientras que las ondas reflejadas por las superficies sólidas del recinto se propagarán por la teoría zona de sombra acústica.
- La pérdida de transmisión de la barrera debe ser varios decibelios superior a la atenuación que se espera conseguir, para que su empleo sea efectivo.
- Deben evitarse los acoplamientos entre la fuente sonora y la barrera, para impedir que esta se transforme en una fuente sonora secundaria, debido a las vibraciones transmitidas.

- Siempre que sea posible, la superficie visible por la fuente sonora deberá estar recubierta por material absorbente acústico, evitándose de esta forma la reflexión de las ondas sonoras.
- Cuando la barrera esté formada por paneles, deberán eliminarse las juntas entre estos, evitándose así caminos fáciles para la transmisión del sonido con la consiguiente disminución de la efectividad de la barrera.

4.6 ABSORCIÓN ACÚSTICA. CONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

Se entiende como Acondicionamiento Acústico de una sala, el tratamiento que han de recibir sus superficies interiores, a fin de absorber el exceso de energía sonora existente en su interior, impidiendo consecuentemente que se produzcan reverberaciones y ecos no deseados, que distorsionen las señales de interés. Igualmente el acondicionamiento acústico deberá mejorar las condiciones de la sala a fin de conseguir en su interior, un campo sonoro uniforme sin zonas sordas y sin localizaciones de las ondas en determinados puntos.

4.6.1 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN

Se define el Coeficiente de Absorción de un material como la relación entre la energía que absorbe y la energía de las ondas sonoras que inciden sobre él, por unidad de superficie.

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorbida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (4.5)$$

Valores de $\alpha = 1$ indican que toda la energía sonora incidente es absorbida, mientras que $\alpha = 0$ representa que toda la energía es reflejada.

El coeficiente de absorción varía para cada material así como con la frecuencia.

4.6.2 ABSORCIÓN ACÚSTICA DE UN MATERIAL

Se entiende por absorción acústica de un material (A) el producto de su coeficiente de absorción (α) por su superficie (S). Matemáticamente esto se expresa por:

$$A = S\alpha$$

La absorción acústica de un material se expresa en m^2 o en Sabines.

4.6.3 ABSORCIÓN DE UN RECINTO

Se entiende por absorción de un recinto en Sabines, A , la absorción acústica total que existe en el interior del mismo. Se puede calcular mediante la expresión:

$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots + S_n\alpha_n \quad (4.6)$$

donde: S_i = Superficie interior del recinto ocupada por el material i

α_i = Coeficiente de absorción del material i .

4.6.4 PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN EL INTERIOR DE RECINTOS CERRADOS

La propagación del sonido en recintos cerrados se ve modificada por las paredes de este. Las ondas sonoras al chocar contra superficies sólidas de las paredes, pierden parte de su energía, al ser absorbida por los materiales de que aquellas están constituidas, mientras que otra parte de la energía sonora es reflejada. En el caso ideal que las paredes fuesen totalmente absorbentes, no existirían ondas reflejadas y la propagación sería como en situación de campo libre o anecoico, es decir, cumpliéndose las ecuaciones del Punto 2.3. Si, por el contrario el recinto fuese de paredes totalmente reflejantes, las ondas sonoras sufrirían una serie de reflexiones, produciéndose ecos.

En esta situación, el nivel de presión sonora en el interior del recinto se mantiene prácticamente constante con la distancia (salvo en puntos muy próximos a la fuente y a las paredes) y se dice que el campo es reverberante.

En la práctica, las situaciones nunca son totalmente anecoicas o reverberantes, ya que siempre existe una cierta absorción acústica en los recintos. Una fuente de nivel de potencia sonora NWS y direccionalidad Q , en el interior de un cerramiento de superficie S y coeficiente medio de absorción α , producirá un nivel de presión sonora NPS , en un punto situado a una distancia r de la fuente, dado por la ecuación:

$$NPS = NWS + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (4.7)$$

donde la Constante de Cerramiento, R, es por definición:

$$R = \frac{\overline{S\alpha}}{1-\alpha} \quad (4.8)$$

con

$$\overline{\alpha} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i \alpha_i}{S} \quad (4.9)$$

siendo: α_i = coeficiente de absorción del material i.

S_i = superficie interior del recinto ocupada por el material i.

$S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n$.

Esta ecuación se pone de manifiesto la influencia de las condiciones del cerramiento:

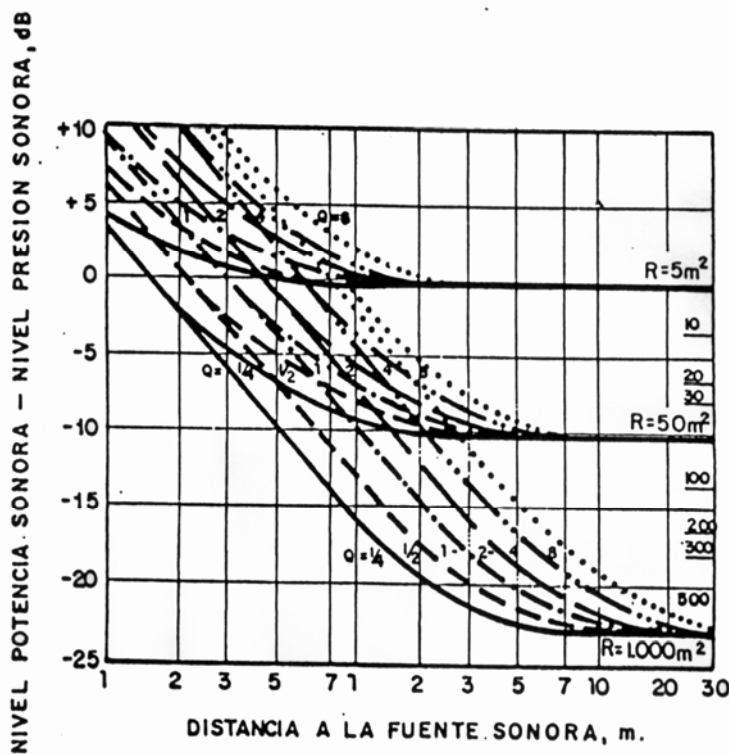
- Si la absorción acústica es mínima o nula, es decir, R pequeño, predomina el término $4/R$ en el paréntesis de la ecuación anterior, con lo cual el nivel sonoro en cualquier punto del recinto es constante, independiente de la distancia (condición reverberante).
- Si la absorción acústica es muy grande, R es grande y predomina el término $Q/4\pi r^2$ del paréntesis, con lo cual el nivel de presión sonora disminuye con la distancia (condición anecoica).

En la Figura 4.3 se presenta esta variación del nivel de presión sonora con la distancia en función de la constante del recinto R.

Por otra parte la ecuación anterior permite predecir la variación del nivel sonoro en un punto situado a una distancia r de la fuente sonora, debido a la adición de materiales absorbentes acústicos en el recinto. Si R_1 y R_2 son las constantes del recinto antes y después de la adición de la absorción, la variación del nivel de presión está dada por:

$$\Delta NPS = 10 \log \left(\frac{\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_2}}{\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_1}} \right) \quad (4.10)$$

FIGURA 4.3 VARIACIÓN DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA CON LA DISTANCIA A LA FUENTE EN INTERIORES PARA DIVERSAS ABSORCIONES



Como consecuencia de todas estas expresiones puede observarse que:

- El empleo de materiales absorbentes en superficies interiores solo reduce el nivel sonoro en puntos lejanos a la fuente, donde predomina el campo reverberante. Cerca de esta el efecto es despreciable, pues predomina el campo directo.
- En la práctica, con el uso de materiales absorbentes se obtiene una reducción máxima del nivel de presión sonora de aproximadamente 6^{-10} dB
- Cuando existan pocas fuentes sonoras en un recinto reverberante, la adición de absorción acústica podrá ocasionar una apreciable disminución del nivel sonoro, especialmente en puntos alejados de las fuentes.
- En situaciones en las que existan gran número de fuentes sonoras en un recinto, tanto reverberante como con una cierta absorción, la adición de materiales absorbentes no produce, en general, una apreciable disminu-

ción del nivel de presión sonora en los puntos del recinto, por cuanto en ellos predomina el campo directo al estar próximos a las fuentes de ruido.

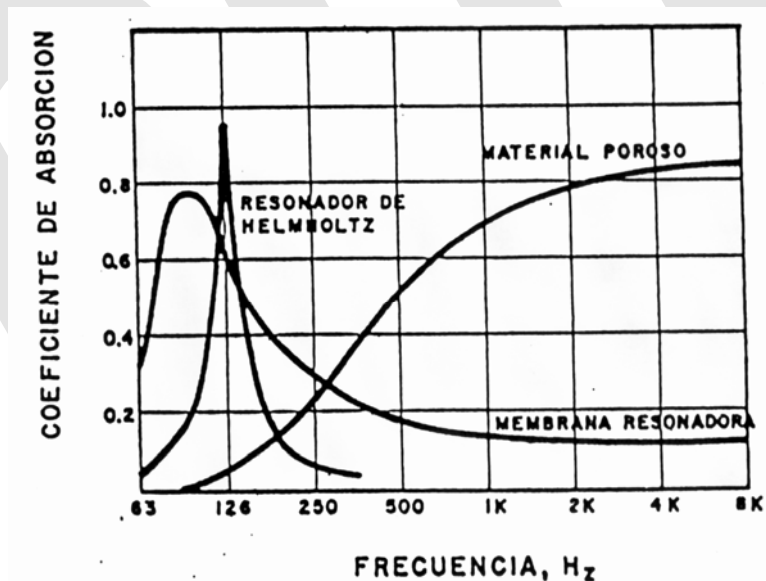
4.6.4 MATERIALES ABSORBENTES

Los diversos materiales empleados como absorbentes acústicos pueden dividirse en:

- Materiales porosos o disipativos
- Membranas o paneles resonadores
- Resonadores de Helmholtz o de cavidad

La Figura 4.4 muestra los coeficientes de absorción típicos para cada uno de estos tres tipos de materiales.

FIGURA 4.4 CURVAS DE ABSORCIÓN PARA LOS DISTINTOS TIPOS DE MATERIALES



- Materiales porosos: disipan la energía acústica en el interior de los orificios que presentan transformándola en calor. El máximo de eficacia ocurre a altas frecuencias, donde las longitudes de onda coinciden con los espesores normales de los materiales utilizados. Pertenecen a este tipo de absorbentes la fibra de vidrio, la lana mineral, la espuma de poliuretano, etc.

- Membranas resonadoras: convierten la energía sonora en movimiento, como resultado de las deformaciones ondulatorias de un panel al ser excitado por un sonido incidente. El máximo de absorción ocurre en la región de las bajas frecuencias y para la frecuencia de resonancia f_r definida por:

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{md}} \quad (4.11)$$

donde: m = masa de panel, en Kg/m²
 d = espesor de la cámara de aire, en m.

El coeficiente de absorción depende del grado de amortiguamiento del material empleado. Aumentando el amortiguamiento del panel se amplía la banda de frecuencias absorbidas, si bien puede disminuir el coeficiente de absorción.

- Resonadores de Helmholtz: son pequeñas cavidades (Figura 4.5) la disipación de energía se produce al hacer oscilar las ondas sonoras el aire contenido en ellas. Presentan un coeficiente de absorción muy elevado, pero que se extiende sobre una banda de frecuencias muy estrecha. Este máximo de absorción ocurre a la frecuencia de resonancia f_r dada por la expresión:

$$f_r = \frac{C}{2\pi} \sqrt{S/IV} \quad (4.12)$$

donde: C = velocidad del sonido en m/s
 S = sección del cuello de la cavidad en m²
 I = longitud del cuello en m
 V = volumen de la cavidad en m³ Figura 4.5

La anchura de banda de las frecuencias absorbidas puede ampliarse colocando material poroso en el interior de la cavidad, pero en este caso se disminuye el coeficiente de absorción del resonador.

En la Tabla 4.1 anterior se presentan los coeficientes de absorción para aquellos materiales más usados.

FIGURA 4.5 ESQUEMA DE RESONADOR DE HELMHOLTZ

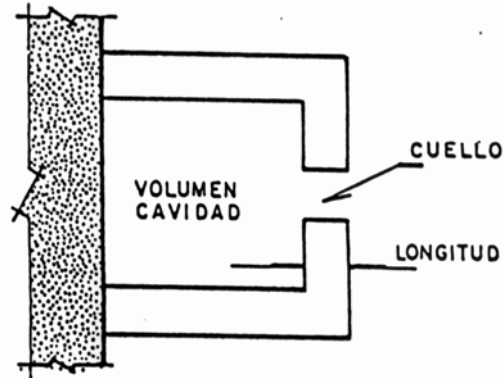


TABLA 4.1 COEFICIENTES DE ABSORCIÓN TÍPICOS DE DIVERSOS MATERIALES

MATERIAL	ESPESOR cm.	CENTROS BANDA FRECUENCIA OCTAVA, Hz							
		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Ladrillo visto		0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.06	0.05	0.05
Hormigón		0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03
Mármol		0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Enlucido yeso		0.04	0.04	0.06	0.06	0.08	0.05	0.06	0.06
Vidrio		0.08	0.17	0.07	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
Cortinas típicas		0.05	0.07	0.15	0.40	0.45	0.50	0.55	0.40
Lana de roca	25	0.05	0.10	0.40	0.65	0.70	0.75	0.80	0.75
	50	0.10	0.15	0.45	0.65	0.75	0.80	0.80	0.80
	100	0.25	0.40	0.65	0.80	0.85	0.85	0.90	0.85
Espuma poliuretano	25	0.10	0.15	0.25	0.55	0.75	0.80	0.90	0.90
Espuma poliuretano	50	0.15	0.20	0.50	0.75	0.95	0.90	0.90	0.90
Techos escayola		0.20	0.20	0.15	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05
Moqueta		0.10	0.10	0.20	0.25	0.35	0.30	0.30	0.30
Suelos plásticos		0.05	0.05	0.10	0.10	0.10	0.05	0.05	0.05
Techos acústicos pesados		0.05	0.10	0.30	0.55	0.60	0.60	0.45	0.40
Techos acústicos separ.		0.20	0.35	0.50	0.70	0.70	0.80	0.75	0.70
Persona sentada		0.15	0.20	0.35	0.45	0.45	0.50	0.45	0.35
Asiento vacío		0.05	0.10	0.10	0.20	0.20	0.25	0.25	0.20

4.6.5 TIEMPO DE REVERBERACIÓN

La medida de las reflexiones que sufren las ondas sonoras en el interior de un local lo constituye el Tiempo de Reverberación, definido como el lapso de tiempo, expresado en segundo, que tarde la densidad media de la energía acústica existente en dicho local en disminuir, hasta alcanzar una millonésima parte de su valor inicial, después que la fuente acústica haya cesado de emitir energía. En términos de decibelios, el tiempo de reverberación es el tiempo que transcurre hasta que el nivel inicial disminuye 60 dB su valor, al cesar la fuente sonora.

Existen varias expresiones para el cálculo del tiempo de reverberación de un local:

- **Fórmula de Sabine.** Sabine dedujo, basándose en la ley exponencial del decrecimiento de la intensidad energética, que el tiempo de reverberación en segundos T, de un local viene dado por la expresión:

$$T = \frac{0,16V}{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n} \quad (4.13)$$

donde V es el volumen del local en m³; S₁, S₂ ..., las distintas superficies envolventes de dicho local en m² y α₁, α₂, ..., los diferentes coeficientes de absorción correspondientes a dichas superficies.

- **Fórmula de Eyring.** Eyring supone, a diferencia de Sabine, que la absorción se realiza en forma discontinua y deduce la fórmula siguiente:

$$T = \frac{-0,16V}{S \ln(1 - \alpha_m)} \quad (4.14)$$

Donde V es el volumen del local en m³ y donde S es la suma de las distintas superficies que componen el local en m² y α_m la absorción media de las mismas:

$$\alpha_m = \frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots}{S} \quad (4.15)$$

- **Fórmulas de Millington.** Dado que en la fórmula de Eyring las distintas superficies deben poseer un coeficiente de absorción muy parecido para que esta se verifique correctamente, Millington deduce su fórmula considerando por separado cada superficie con su coeficiente de absorción correspondiente.

$$T = \frac{-0,16V}{S_1 1n(1-\alpha_1) + S_2 1n(1-\alpha_2) + \dots} \quad (4.16)$$

Donde V, S1 y α_1 tienen el mismo significado que en las ecuaciones anteriores.

Las tres fórmulas son utilizadas en el cálculo de tiempos de reverberación, el empleo normal de las mismas puede apoyarse en las consideraciones siguientes:

- Sabine:
 - Si el coeficiente medio de absorción es relativamente bajo ($\alpha < 0,25$);
 - Si los materiales absorbentes están distribuidos uniformemente
- Eyring:
 - Si los materiales absorbentes están distribuidos uniformemente;
 - Si se requiere un cálculo preciso.
- Millington:
 - Si los materiales absorbentes no están no están uniformemente distribuidos;
 - Si las superficies son todas grandes y no hay ninguna muy fuertemente absorbente.

En las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8 se presentan los tiempos de reverberación óptimos para distintos tipos de recinto en función de los volúmenes de los mismos.

FIGURA 4.6 TIEMPOS DE REVERBERACIÓN ÓPTIMOS PARA FRECUENCIAS MEDIAS (500-1000 Hz)

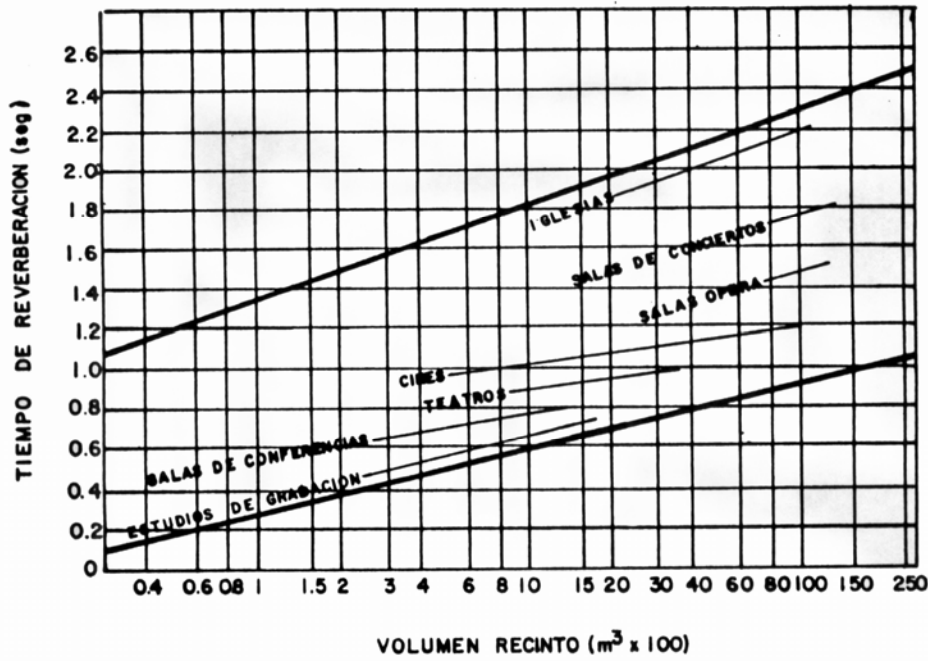


FIGURA 4.7 TIEMPOS DE REVERBERACIÓN ÓPTIMOS PARA PALABRA

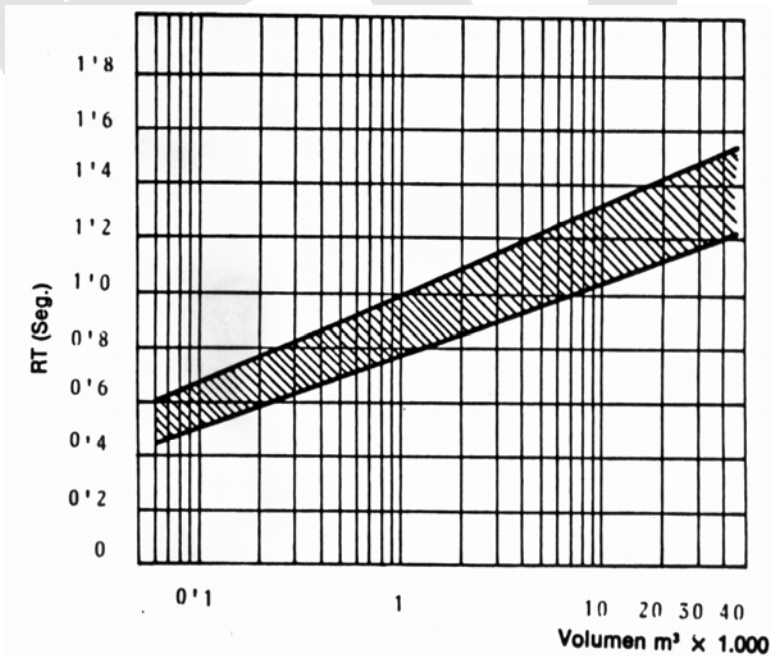
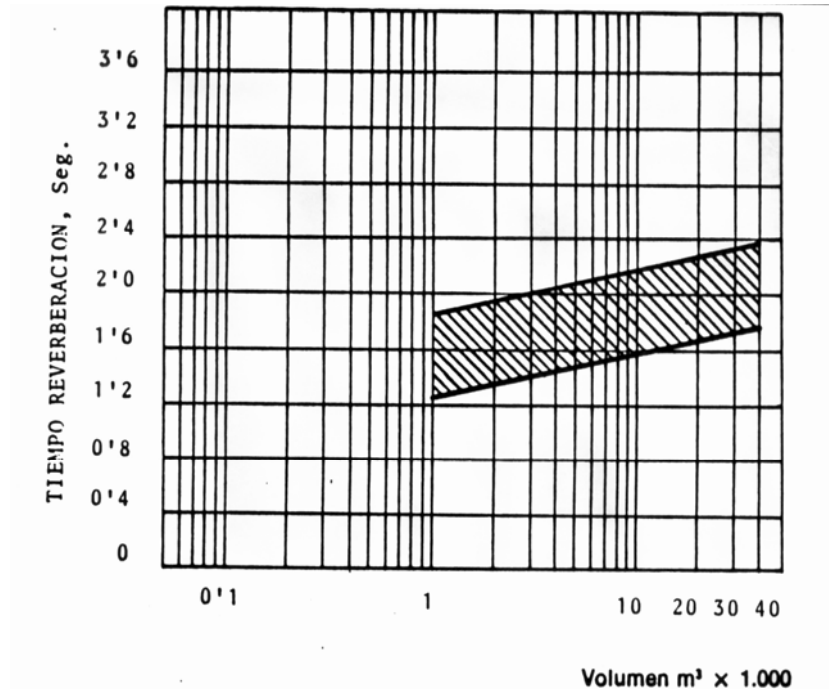


FIGURA 4.8 TIEMPOS DE REVERBERACIÓN ÓPTIMOS PARA MÚSICA



4.7 AISLAMIENTO ACÚSTICO

4.7.1 CERRAMIENTOS

Uno de los métodos más empleados para realizar acciones de control de ruido en fuentes sonoras ya instaladas, es el uso de cerramientos acústicos. Como su nombre indica, esta técnica de control consiste en encerrar la fuente sonora mediante una cabina más o menos complicada.

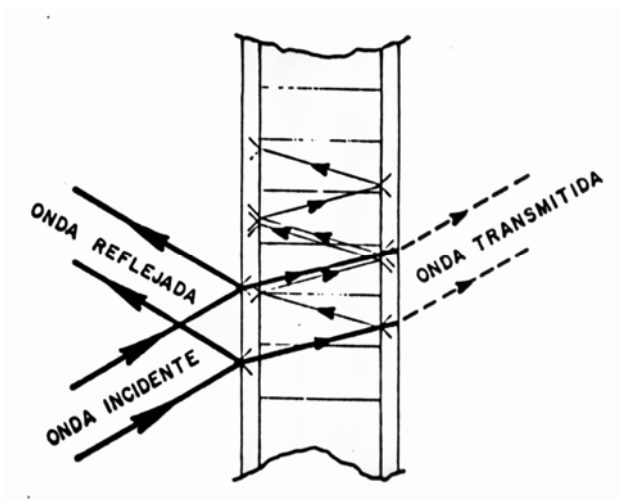
Este método se basa en la pérdida de energía, que experimentan las ondas sonoras al cambiar de medio.

En efecto, cuando una onda sonora incide en su propagación con una superficie sólida, parte de su energía es reflejada al medio en que se propaga y parte es transmitida al segundo medio.

En el caso de que una superficie sólida tenga un cierto espesor, el efecto será el que se indica en la Figura 4.9; esto es, parte de la energía sonora de la

onda incidente será reflejada y parte transmitida al existir un cambio de medio (aire-sólido).

FIGURA 4.9 TRANSMISIÓN DE ONDAS SONORAS A TRAVÉS DE UN MEDIO HOMOGÉNEO



La onda transmitida, al propagarse en el medio sólido sufrirá el proceso anterior al pasar nuevamente al aire. Dado que las fuerzas intermoleculares en el interior del sólido son mayores que en el interior del aire. Las ondas sonoras sufrirán una pérdida de energía al propagarse por el interior del sólido. Este efecto continuará sucesivamente, y si el campo sonoro en el medio 1 es constante, se alcanzará en equilibrio, pudiéndose definir un coeficiente de Transmisión τ como la relación entre las energías de las ondas transmitidas e incidente:

$$\tau = \frac{E_{\text{transmitida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (4.17)$$

Más interesante que el coeficiente de transmisión como medida del aislamiento acústico de los materiales, es la diferencia entre los niveles de intensidad de las ondas incidente y transmitida. Esta diferencia se llama Pérdida por Transmisión, TL y esta relacionada con el coeficiente de transmisión por la expresión:

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (4.18)$$

Teniendo en cuenta las relaciones del Punto 1.3, esta expresión se puede también escribir en función de los niveles de presión sonora interior (NPS_D) y exterior (NPS_F) como:

$$TL = NPS_D - NPS_F$$

En resumen y de forma general se puede establecer que la Pérdida de Transmisión o aislamiento acústico no es sino la diferencia de niveles, en dB, que existen a ambos lados de la partición.

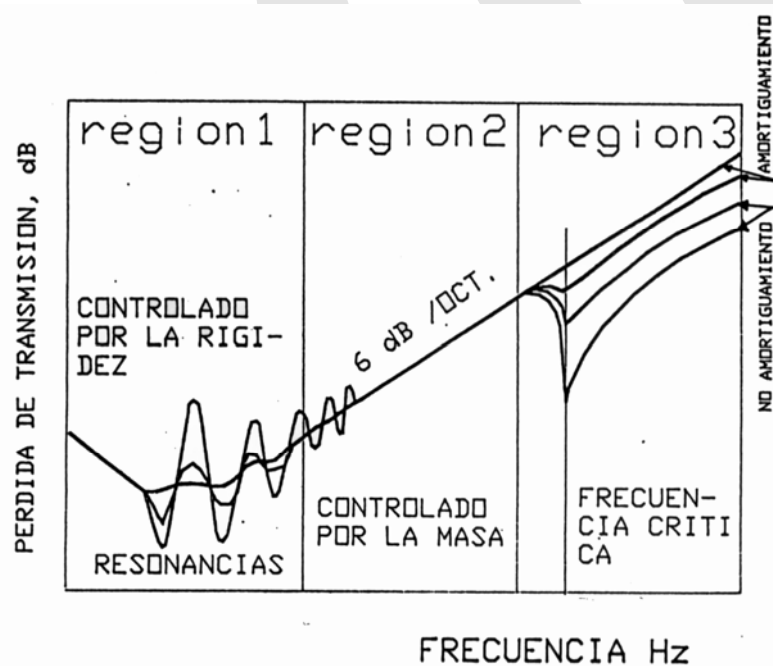
Este aislamiento depende tanto de las características de los materiales como de la frecuencia.

4.7.1 PARTICIONES SIMPLES

Una partición simple está constituida por una lámina homogénea de un determinado material que separa dos medios elásticos (aire).

Un esquema de variación de la pérdida por transmisión con la frecuencia para este tipo de particiones se presenta en la Figura 4.10 donde se pueden distinguir tres zonas:

FIGURA 4.10 VARIACIÓN DE LA PÉRDIDA POR TRANSMISIÓN CON LA FRECUENCIA PARA UNA PARTICIÓN SIMPLE



- Región 1: Está controlada por la rigidez del panel, que origina este comportamiento como una membrana, presentando una serie de frecuencias naturales de resonancia para las cuales disminuye las pérdidas de transmisión. Esta zona comprende el rango más inferior del espectro audible.

- Región 2: El movimiento del panel está controlado por la masa del mismo. Matemáticamente la pérdida por transmisión en esta región puede calcularse, para la incidencia normal de las ondas sonoras, mediante la expresión:

$$TL_0 = 10 \log \left(1 + \left(\frac{mw}{2\rho_0 C} \right)^2 \right) \quad (4.19)$$

donde: m = masa superficial del panel, en kg/m^2

$w = 2 \pi f$ (siendo f la frecuencia de la onda incidente), en rad/s .

ρ_0 = densidad del aire, en kg/m^3

c = velocidad del sonido en el aire, en m/s .

A efectos prácticos esta expresión puede aproximarse con suficiente exactitud por:

$$TL_0 = 20 \log mf - 43 \quad (4.20)$$

De estas ecuaciones se deduce que:

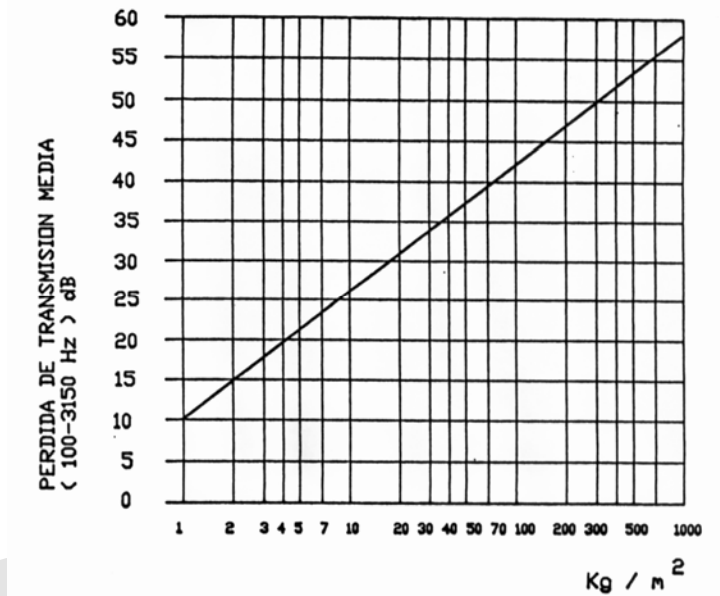
- La pérdida por transmisión aumenta 6 dB por octava (doble de frecuencia)
- La pérdida por transmisión aumenta 6 dB al duplicarse la masa superficial del panel. Esto se conoce por la Ley de Masa. Una representación de esta ley está dada en la Figura 4.11, donde se muestra pérdida de transmisión media de un panel en función de la masa superficial de este.

En la práctica, las ondas sonoras no inciden de forma perpendicular en las paredes de un recinto, si no que lo hacen bajo todos los ángulos, esto es, en condiciones de campo difuso.

Los valores de las pérdidas de transmisión para incidencia normal, TL_0 , y para campo difuso, TL_d , están relacionadas mediante la expresión:

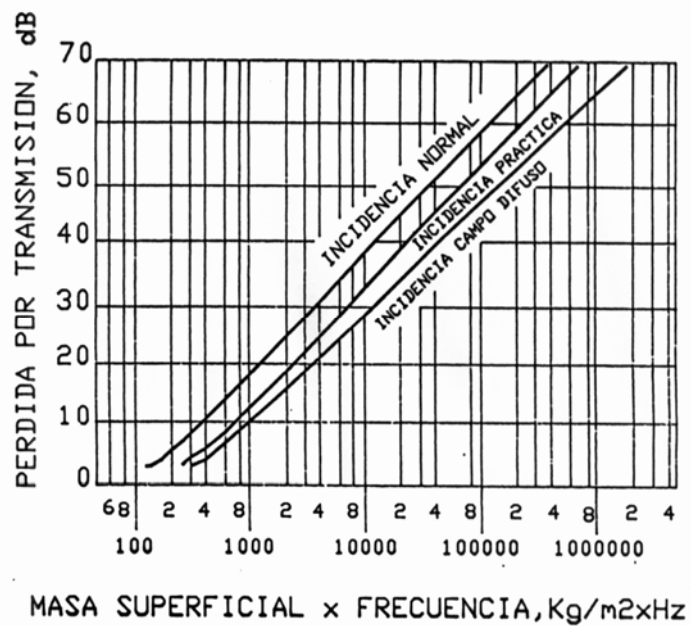
$$TL_d = TL_0 - 10 \log(0,23 TL_0) = 20 \log mf - 48 \quad (4.21)$$

FIGURA 4.11 GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA PÉRDIDA POR TRANSMISIÓN EN FUNCIÓN DE LA MASA SUPERFICIAL



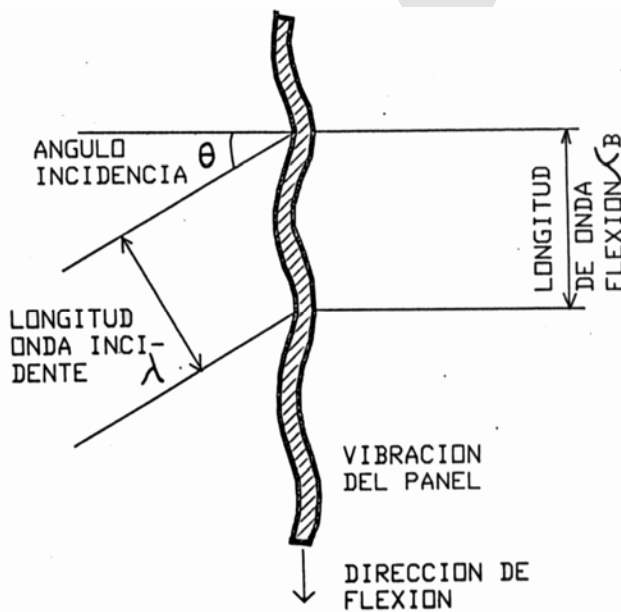
En la Figura 4.12 se representan las gráficas de los valores de la pérdida por transmisión para incidencias de las ondas sonoras normal, difusa y práctica en función de la masa superficial y la frecuencia.

FIGURA 4.12 VALORES TEÓRICOS DE LA LEY DE MASA



- Región 3: Está controlada por la rigidez y el amortiguamiento interno del panel, presentando una disminución de la pérdida por transmisión apreciable debido al efecto de coincidencia. Este efecto tiene lugar (Figura 6-13) cuando la proyección de la longitud de onda del sonido incidente es igual a la longitud de onda de la onda libre de flexión a lo largo del panel. (que depende de las características físicas del propio panel).

FIGURA 4.13 INCIDENCIA OBLICUA DE ONDAS SONORAS SOBRE UNA PARTICIÓN FLEXIBLE



La frecuencia en que se presenta el efecto de coincidencia se llama Frecuencia Crítica f_c y puede calcularse mediante la ecuación:

$$f_c = \frac{c^2}{1.8e} \sqrt{\rho/E} \quad (4.22)$$

donde:

c = velocidad del sonido en el aire, en m/s

e = espesor del panel en m

ρ = densidad del panel, en kg/m^3

E = módulo de Young del panel, en N/m^2

Los valores de la frecuencia crítica para diversos materiales están dados en la Tabla 4.2 y en las Figuras 4.14 a 4.16.

TABLA 4.2
FRECUENCIAS CRÍTICAS Y DENSIDADES SUPERFICIALES PARA DIVERSOS MATERIALES

MATERIAL	FRECUENCIA CRÍTICA DENSIDAD SUPERFICIAL Hz x Kg/m ⁻²	DENSIDAD SUPERFICIAL POR UNIDAD DE ESPESOR Kg m ⁻² , mm ⁻¹
Plomo	600.000	11,2
Acero	97.000	8,1
Hormigón armado	44.000	2,3
Muro ladrillo	42.000	1,9
Vidrio	39.000	2,5
Perspex	35.500	1,15
Lámina fibrocemento	33.600	1,9
Aluminio	37.200	2,7
Lámina escayola	32.000	0.75
Contrachapado	13.000	0,58

FIGURA 4.14 PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN PARA DIVERSOS MATERIALES

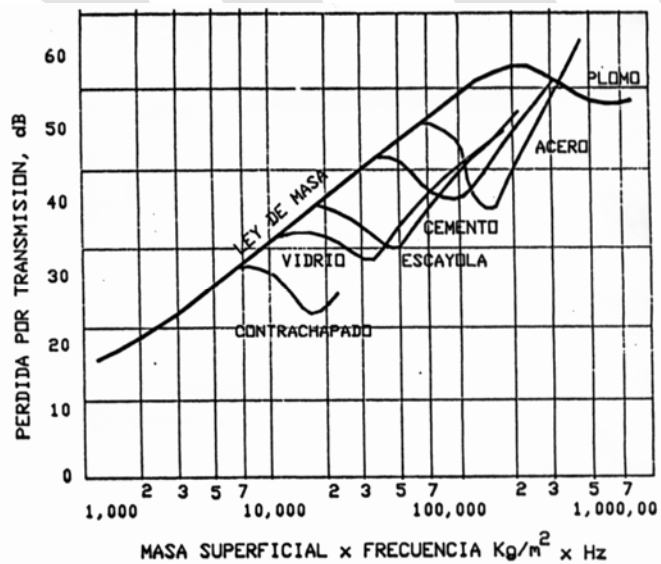


FIGURA 4.15 FRECUENCIA CRÍTICA DE ALGUNOS MATERIALES

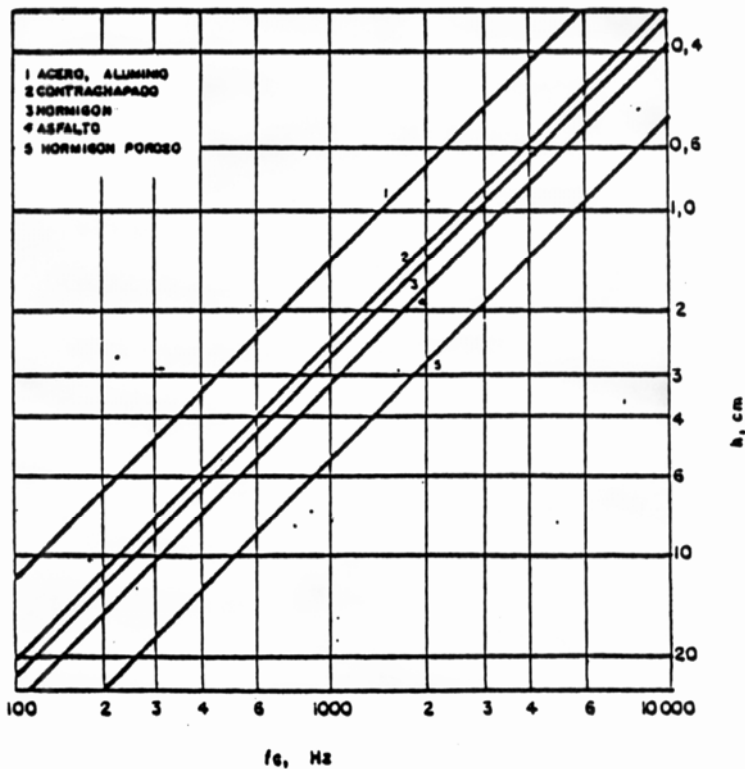
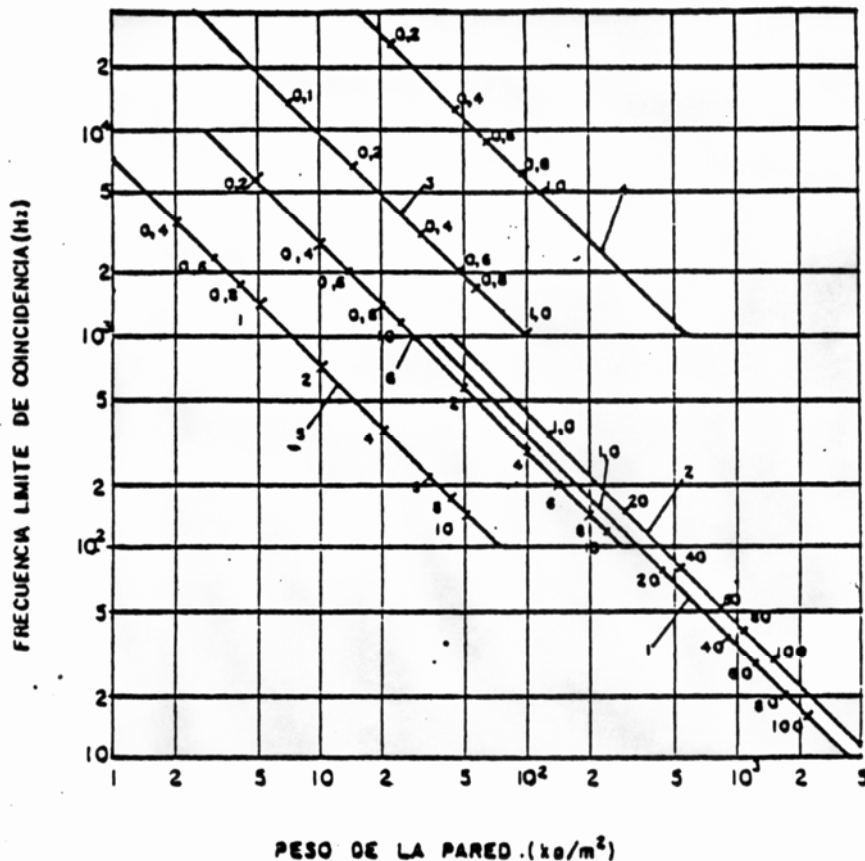


FIGURA 4.16 FRECUENCIA CRÍTICA EN FUNCIÓN DEL PESO: 1) HORMIGÓN; 2) LADRILLO; 3) ACERO; 4) PLOMO; 5) MADERA CONTRACHAPADA; 6) VIDRIO



4.7.2 PARTICIONES DOBLES

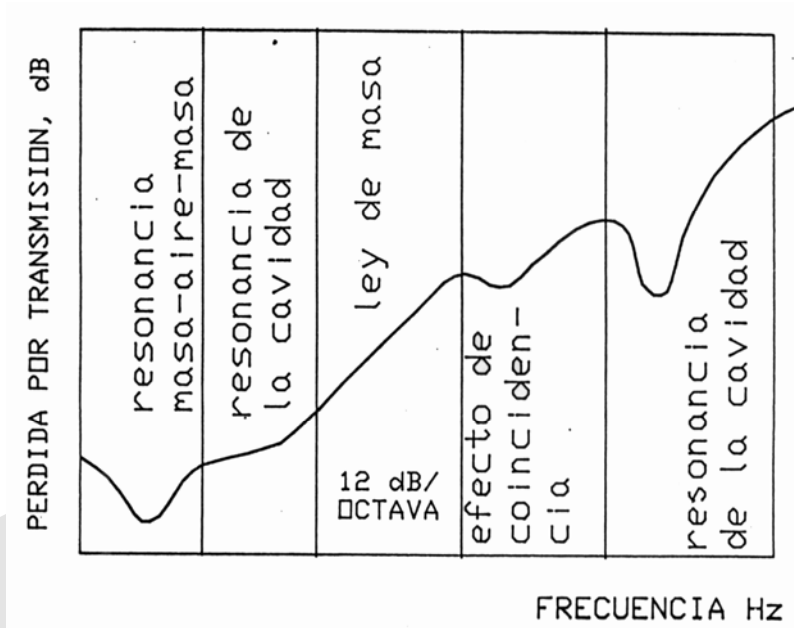
Las particiones dobles están constituidas por dos láminas paralelas separadas por una cavidad de aire. Las láminas pueden ser de materiales iguales o diferentes y del mismo o distinto espesor. En ocasiones la cavidad está ocupada por un material absorbente acústico.

En el caso límite es decir cuando la cavidad tiene un espesor suficientemente grande, las dos láminas actúan independientemente y el aislamiento acústico total es la suma de las pérdidas por transmisión individuales.

En la Figura 4.17 se presenta la variación con la frecuencia de la pérdida por transmisión ofrecida por una partición doble, indicando los fenómenos que

ocurren en cada una de las regiones en que se divide el campo de frecuencias.

FIGURA 4.17 VARIACIÓN DE LA PÉRDIDA POR TRANSMISIÓN CON LA FRECUENCIA PARA UNA PARTICIÓN DOBLE



Una expresión empírica de la pérdida por transmisión media de una partición está dada por:

$$(TL)_{EMP} = 20 \log (MD) + 34 \quad (4.23)$$

donde:

M = masa total, kg/m²

D = separación entre paredes, m.

4.7.3 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

En la tabla 4.3 se indican los valores de la pérdida por transmisión para diversos materiales de uso habitual

TABLA 4.3 PÉRDIDAS POR TRANSMISIÓN TÍPICAS DE DISTINTOS MATERIALES

MATERIAL	ESPESOR Mm.	PESO Kg/m ²	CENTROS BANDAS FRECUENCIAS Hz							
			63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
Aluminio	1,0	2,6	8	11	10	11	17	24	25	30
Acero	1,0	7,0	3	7	15	19	25	32	37	39
Acero	1,5	13,0	9	13	22	28	32	38	42	41
Plomo	1,5	17,0	21	29	32	34	32	32	34	37
Plomo	3,0	34,0	25	31	32	28	37	43	33	39
Vidrio	3,0	7,0	11	15	15	20	23	29	26	31
Vidrio	6,0	14,0	17	11	24	29	31	26	36	39
Vidrio	10,0	23,0	19	23	25	32	31	31	40	42
Aglomerado de madera	12,0	4,0	9	11	16	19	26	30	32	36
Madera sólida	50,0	25,0	14	20	22	25	31	38	43	45
Cartón-yeso	10,0	7,0	10	14	21	23	30	31	36	38
Ladrillo hueco sencillo enlucido	60	75	25	31	30	29	30	39	44	49
Ladrillo hueco doble (tabicón)	120	94	27	30	30	32	40	46	52	56
Ladrillo 1/2 pie macizo enlucido	150	185	36	41	35	43	51	59	64	68
Losa hormigón	100	220	31	37	36	45	51	60	62	64
Losa hormigón	300	700	37	41	45	53	60	63	67	72
Puerta ligera	45	9	9	14	17	19	18	21	26	29
Puerta acústica especial	100	----	35	37	40	45	50	57	59	63
Ventana simple marco aluminio	6	----	17	11	24	28	32	28	35	41
Ventana doble marco aluminio	25	63	25	27	30	30	34	44	48	54
Pared ladrillo sencillo enlucidos	-----	140	28	34	36	36	38	49	60	67
Pared ladrillo macizo enlucido	-----	140	28	33	34	41	55	72	76	79

En el empleo de diseño de cerramientos acústicos debe considerarse:

- Debe entenderse como cerramientos y cabinas tanto aquellas instalaciones que evitan que el ruido producido por una fuente se radie al medio entorno a ella, como aquellas otras que son colocadas en un medio ruidoso a fin de obtener un área con menor nivel sonoro. Pueden incluirse en este último punto los tabiques en edificación, techos, etc.
- La pérdida de transmisión es función de la frecuencia; las bajas frecuencias se transmiten más fácilmente que las altas. Consecuentemente, el rendimiento de un material solo está bien definido conociendo la pérdida de transmisión en función de la frecuencia. Sin embargo, el valor medio puede ser estimativo, y como tal debe ser considerado.

- La pérdida por transmisión depende del ángulo de incidencia de las ondas sonoras. A efectos prácticos deben considerarse los valores de TL de campo difuso, por presentarse este en la mayoría de las situaciones.
- Los materiales a utilizar en el cerramiento deben tener unas pérdidas por transmisión adecuadas al aislamiento que se desea obtener y según el espectro del ruido producido por la fuente sonora. Esto puede originar que sea necesario el uso de paneles compuestos formados por láminas de diversos materiales con distintos TL, bien sean superpuestos o dejando una cámara de aire entre las superficies. En estos casos, la pérdida por transmisión de los aislamientos de paneles simples será una combinación que les constituyen.

En general se puede establecer que TL total es menor que la suma de los TL individuales.

- Al encerrar una fuente sonora, existirá un aumento del nivel de presión sonora en los puntos interiores como consecuencia del incremento del campo reverberante. Para evitar este aumento del nivel sonoro que reduce la eficacia del cerramiento proyectado, debe colocarse material absorbente acústico en la parte interior de las paredes de dicho cerramiento.
- Los cerramientos pueden presentar superficies de diversos materiales, cada uno de ellos con diferentes pérdidas de transmisión. Al ser el sonido radiado por las partes más débiles del cerramiento, el efecto de las superficies con menor TL es el de producir una disminución de la pérdida por transmisión del cerramiento. Esta disminución dependerá de la relación de superficies de los distintos materiales y de los distintos TL.

La pérdida de transmisión total será:

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (4.24)$$

con:

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \tau_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4.25)$$

siendo:

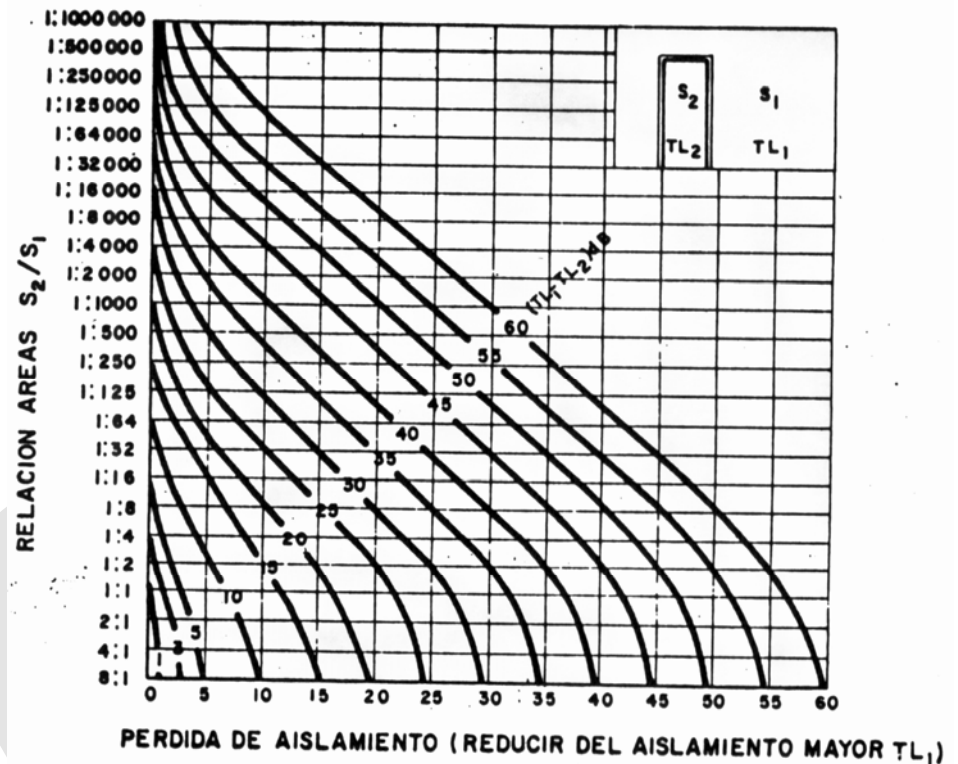
A_i = área de la superficie i

τ_i = coeficiente de transmisión del material de la superficie i .

Considerando $\tau = 1$ para aquellas superficies abiertas.

La Figura 4.19 muestra una gráfica que permite el cálculo de la pérdida por transmisión resultante de la combinación de diferentes elementos.

Figura 4.19 Curvas para el cálculo de la pérdida por transmisión resultante al considerar dos superficies de materiales distintos



- En la instalación de cerramiento deben evitarse las conexiones y uniones entre este y la fuente de ruido a fin de evitar la presencia de "puentes acústicos" que disminuyen el aislamiento acústico. Por la misma razón se evitará que el cerramiento descansa en la misma bancada en que lo hace la fuente sonora.
- Deberá evitarse que el panel del cerramiento pueda transformarse en una fuente secundaria de ruido al ser excitado por las ondas incidentes. Este fenómeno se presenta para aquellas frecuencias del ruido que coinciden con la frecuencia de resonancia del panel.

4.8 ATENUADORES

Se llaman atenuadores o silenciadores aquellos elementos que se instalan en conducciones de fluidos que transportan energía sonora para la absorción de esta.

En la industria, el uso de atenuadores es una forma del control del ruido proveniente de:

- Las pulsaciones de presión en compresores y bombas
- El flujo turbulento a alta velocidad en las válvulas de control.
- Los escapes de gas a alta presión en equipos neumáticos
- Los flujos de aire creados por los sistemas de ventilación y calefacción
- Etc.

Los atenuadores pueden ser de absorción o reactivos.

4.8.1 ATENUADORES DE ABSORCIÓN

Estos sistemas se basan en la disipación progresiva de la energía sonora mediante el empleo de materiales absorbentes. Presentan una atenuación apreciable del sonido en una amplia gama de frecuencias, por lo que se emplean, preferentemente, en sistemas de aire acondicionado, ventiladores, etc.

El modelo más sencillo de un atenuador de este tipo consiste en un conducto cuyas paredes están recubiertas por un material absorbente. La atenuación para las ondas sonora propagándose paralelas al eje del conducto puede calcularse mediante la expresión:

$$A = 1,05 \alpha^{1,4} \frac{P}{S} \quad (4.26)$$

donde:

A = Atenuación por unidad de longitud, en dB/m

α = Coeficiente de absorción del material que recubre las paredes internas

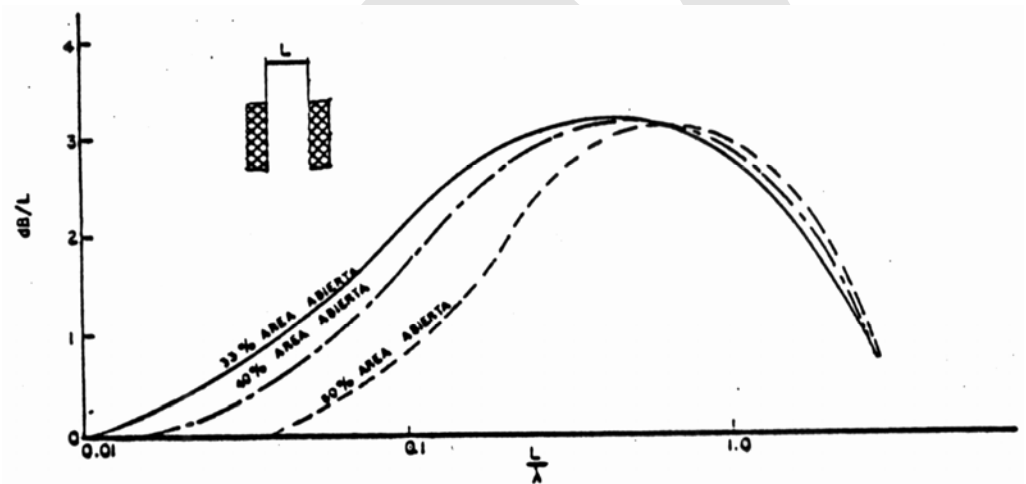
P = Perímetro del conducto, en m

S = Sección del área abierta del conducto, en m²

La atenuación dada en la ecuación anterior varía de la siguiente forma (Figura 4.20):

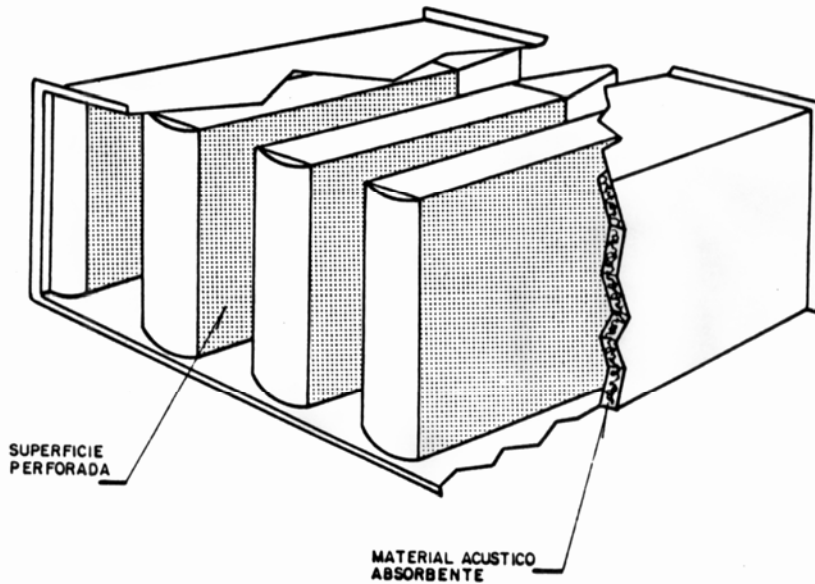
- Para bajas frecuencias, al ser α pequeño, el valor de A es, asimismo, pequeño
- Al aumentar la frecuencia, aumenta el valor de A, pasando por un máximo. La frecuencia a que este máximo se produce depende no solo de las propiedades del material absorbente, sino también de las dimensiones del conducto.
- Para altas frecuencias, hay una disminución entre los valores teórico y real de la atenuación, debido a que las longitudes de onda asociadas son más pequeñas que las dimensiones del conducto y su trayectoria pasa a ser paralela al eje a oblicua, siendo consecuentemente, menos absorbida por los materiales colocados al efecto de las paredes internas del conducto.

FIGURA 4.20 ATENUACIONES TÍPICAS DE UN SILENCIADOR RECTANGULAR



Una mayor atenuación por unidad de longitud del conducto puede obtenerse por la instalación de separadores Figura 4.21.

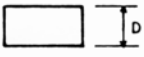
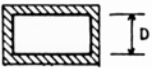



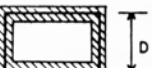


FIGURA 4.21 ESQUEMA DE ATENUADOR DE ABSORCIÓN



El efecto de estos elementos es obtener un conjunto de conductos absorbentes cuya anchura es pequeña con relación a la altura; consecuentemente, se obtiene un mayor valor para la expresión P/S . Sin embargo esto puede originar una pérdida de carga, que debe ser compensada aumentando, con respecto al conducto inicial, el área de la sección abierta.

En la Tabla 4.4 se muestra la atenuación ofrecida por silenciadores con distinta sección.

TABLA 4.4 ATENUACIÓN OFRECIDA POR VARIOS SILENCIADORES

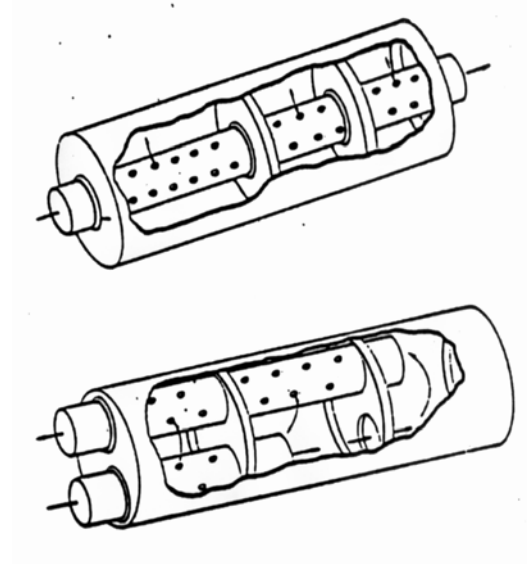
CONDUCTO LISO		D (mm)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
	CHAPA METALICA	75-180	0.2	0.2	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
		205-380	0.2	0.2	0.15	0.1	0.07	0.07	0.07	0.07
		405-760	0.2	0.2	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
		815-1525	0.1	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
	CHAPA METALICA RECUBIERTA	75-180	0.4	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
		205-380	0.4	0.4	0.3	0.1	0.07	0.07	0.07	0.07
		405-760	0.4	0.4	0.2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
		815-1525	0.1	0.1	0.1	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
	CHAPA METALICA	75-180	0.03	0.03	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1
		205-380	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07
		405-760	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05
		815-1525	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	CHAPA METALICA RECUBIERTA	75-178	0.06	0.06	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1
		205-381	0.06	0.06	0.06	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07
		405-762	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05
		813-1524	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
CONDUCTO CON MATERIAL ABSORBENTE		D (mm)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
	CHAPA METALICA	75	0.2	0.2	0.8	3.6	8.5	12.0	12.0	12.0
		125	0.2	0.2	0.4	2.4	5.5	7.6	6.4	6.4
		205	0.2	0.2	0.2	1.6	3.8	4.6	2.0	1.0
		405	0.1	0.1	0.1	1.1	2.2	1.0	0.1	0.1
	CHAPA METALICA RECUBIERTA	75	0.4	0.4	1.6	3.6	8.5	12.0	12.0	12.0
		125	0.4	0.4	0.8	2.4	5.5	7.6	6.4	6.4
		205	0.4	0.4	0.4	1.6	3.8	4.6	2.0	1.0
		405	0.2	0.2	0.2	1.1	2.2	1.0	0.1	0.1
	CHAPA METALICA	75	0.2	0.2	6.8	3.6	8.5	12.0	12.0	12.0
		125	0.2	0.2	0.4	2.4	5.5	7.6	6.4	6.4
		205	0.2	0.2	0.2	1.6	3.8	4.6	2.0	1.0
		405	0.1	0.1	0.1	1.1	2.2	1.0	0.1	0.1
	CHAPA METALICA RECUBIERTA	75	0.4	0.4	1.6	3.6	8.5	12.0	12.0	12.0
		125	0.4	0.4	0.8	2.4	5.5	7.6	6.4	6.4
		205	0.4	0.4	0.4	1.6	3.8	4.6	2.0	1.0
		405	0.2	0.2	0.2	1.1	2.2	1.0	0.1	0.1

(ATENUACION EXPRESADA EN dB/0,3 m)

4.8.2 ATENUADORES REACTIVOS

Están constituidos por una serie de cavidades intercomunicadas, con cambios de sección Figura 4.22. Se basan en reflexiones que experimentan las ondas sonoras como consecuencia de las variaciones de impedancia acústica en los cambios de sección citados.

FIGURA 4.22 ESQUEMAS DE ATENUADORES REACTIVOS



La atenuación que ofrecen estos sistemas depende en gran manera de su geometría y diseño, siendo muy selectivos en cuanto a frecuencias que atenúan, por lo que se emplean en el control de ruidos que presentan tonos puros o frecuencias discretas.

4.9 PROTECCIÓN PERSONAL

Para ejercer una acción de control de ruido en el receptor deben considerarse dos situaciones distintas y claramente definidas:

- El receptor está sometido al ruido propio de la actividad que realiza
- El receptor está sometido al ruido producido por otras actividades ajenas a él.

En la primera situación el control se realiza mediante:

- Una reducción de la exposición diaria al ruido, es decir, alternando los períodos en los cuales el individuo está sometido a niveles sonoros elevados con otros períodos más tranquilos y silenciosos. Esto se consigue mediante rotación de los puestos de trabajo, horario restringido, instalación de cabinas donde poder descansar de los niveles elevados, etc.

En las situaciones anteriores donde se combinan dos o más períodos de exposiciones diferentes, es oportuno la utilización del concepto de Dosis de Ruido (DR), definido como:

$$DR = \frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} + \dots + \frac{C_n}{T_n} \quad (4.27)$$

donde:

C_n = tiempo de exposición a un nivel sonoro determinado

T_n = tiempo máximo de exposición permitida a ese nivel. Tabla 4.5.

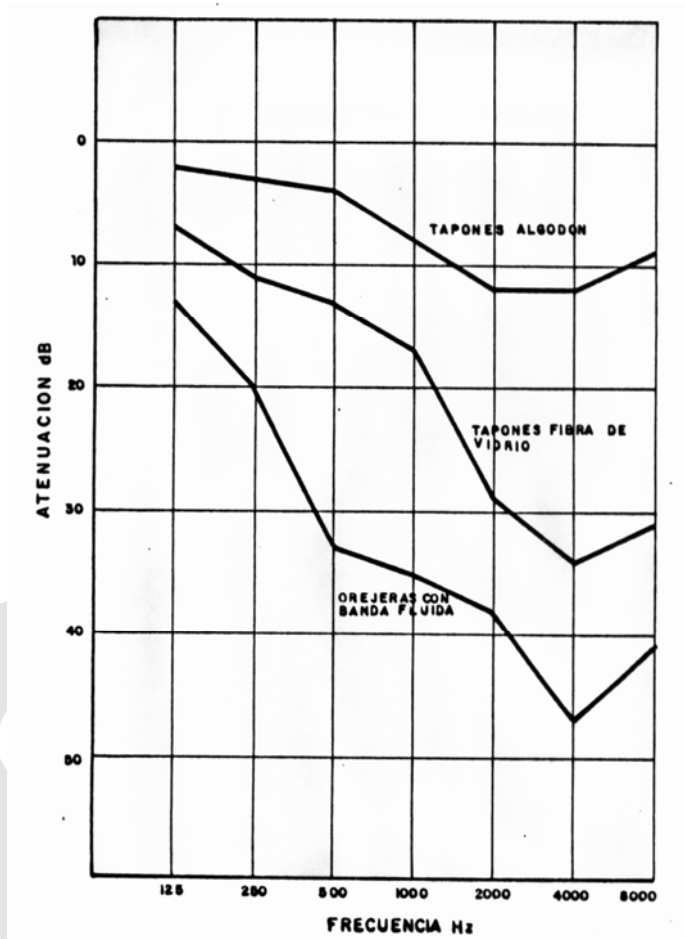
Si la Dosis de Ruido excede la unidad, el individuo se encuentra por encima de los límites establecidos y existe riesgo de pérdida de audición inducida por ruido. La idea de alternar los períodos de exposición a niveles elevados con otros más silenciosos, es la de conseguir que la Dosis de Ruido sea inferior a la unidad.

- El uso de protectores personales, tales como tapones (de algodón, fibra de vidrio, caucho, etc.) y auriculares u orejeras (con banda elástica de sujeción de espuma o fluido, etc.). En la Figura 4.23 se representan las atenuaciones para alguno de estos elementos.

TABLA 4.5 NIVELES DE RUIDO PERMITIDO

HORAS DIARIAS DE EXPOSICIÓN	NIVEL SONORO
8	80,0
6	81,5
4	83,0
3	84,5
2	86,0
1 1/2	87,5
1	89,0
1/2	93,0
1/4 ó menos	96,0

FIGURA 4.23 CURVAS DE ATENUACIÓN SONORA PARA DISTINTOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL



En el caso en que el receptor recibe el ruido de fuentes ajenas a él, las técnicas de control pueden ser:

- Aislamiento acústico del local en que se encuentra
- Tratamiento acústico de interiores.
- Instalación de barreras
- Emisión de sonidos (por ejemplo, música ambiental), que enmascaran el ruido.
- Etc.

5 TRÁFICO RODADO

5.1 RUIDO DE TRÁFICO

El ruido generado por el tráfico rodado en calles, carreteras y autopistas constituye el tipo de ruido más común a que está sometida la comunidad, hasta el extremo que un gran porcentaje de la comunidad lo considera como el “ruido de fondo” sobre el que se producen los demás tipos de ruido (generado por aeronaves, por instalaciones industriales, por la propia comunidad, etc.) Hay que indicar, no obstante que ese ruido de tráfico sea aceptado por la comunidad, aunque la envergadura del problema lo haga a parecer ante ellas como un problema de solución espontánea, e incluso así lo contemplan algunas autoridades.

Prestando atención a ese ruido de tráfico tan común, se puede distinguir fácilmente un ruido de fondo continuo y constante procedente de las vías de circulación más alejadas, sobre el que se superpone el ruido intermitente del paso de vehículos individuales por vías cercanas o en el caso de tráfico elevado el debido a vehículos con distinta generación de ruido (en intensidad y frecuencia).

En consecuencia se puede establecer que aunque no sean las fuentes de ruido más ruidosas, automóviles y camiones, aseguran un papel dominante en el medio ambiente por su número y proximidad a la comunidad.

La causa de esta desfavorable situación española hay que buscarla en distintas áreas:

- La falta de una política ambiental durante la etapa de rápido desarrollo de la nación.
- La explosión demográfica de las ciudades, con un trasvase masivo de población desde las zonas rurales, sin adecuada planificación.
- El enorme crecimiento del parque automovilístico español en unos pocos años.
- La mayor participación en España que en el resto de Europa, de los vehículos pesados en el transporte total de mercancías.
- La falta de aplicación de una normativa que controle los niveles de emisión de los vehículos individuales.

- El pobre aislamiento acústico de las fachadas, agravado en verano al mantener las ventanas abiertas.

5.2 ÍNDICES DE MEDIDA. EL RUIDO DE TRÁFICO

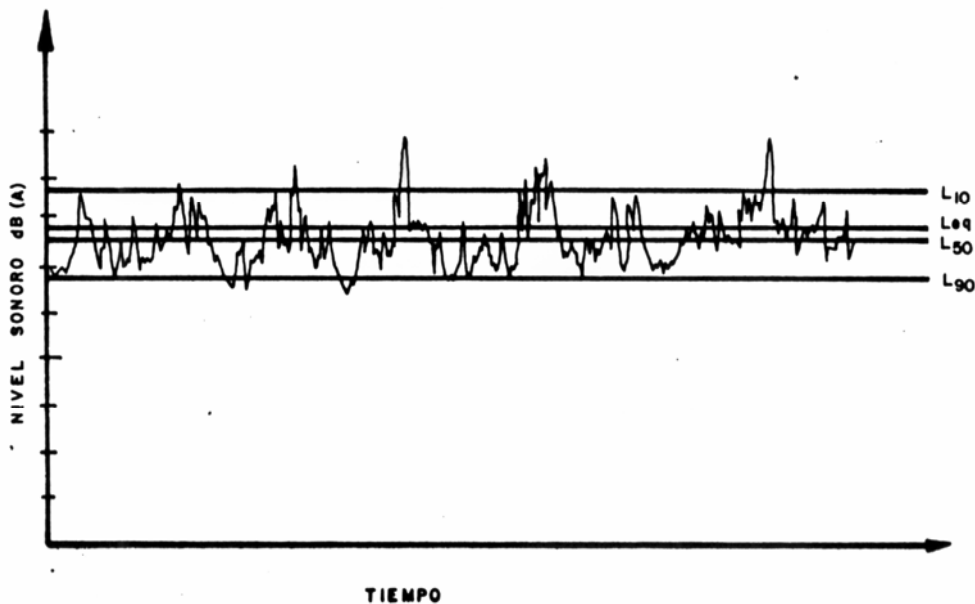
Los índices y niveles de medida empleados en definir el ruido producido por el tráfico rodado son:

- Niveles estadísticos. El nivel sonoro producido por el tráfico rodado no es constante, sino por el contrario presenta variaciones fluctuantes con el tiempo (Figura 5.1). Puede definirse un nivel estadístico L_n que representa el nivel sonoro en dB(A) sobre pasado n por ciento del tiempo.

Son particularmente interesantes los niveles L_{10} , L_{50} y L_{90} , que representan, aproximadamente, los niveles máximos, medio y mínimo o ruido de fondo.

FIGURA 5.1

VARIACIÓN CON EL TIEMPO DEL NIVEL SONORO PRODUCIDO POR EL TRÁFICO RODADO



- Nivel continuo equivalente (L_{eq}). Se define el nivel continuo equivalente de un ruido que varía de forma aleatoria, durante un período de tiempo

como el nivel de un ruido constante, que tuviera la misma energía sonora que aquél durante el mismo período de tiempo.

Matemáticamente se define como:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} dt \quad (5.1)$$

donde T es el período de tiempo considerado y L(t) es el nivel sonoro instantáneo.

Si se supone que los valores instantáneos de los niveles sonoros de tráfico siguen una distribución normal, se puede establecer:

$$L_{eq} = L_{50} + \frac{(L_{10} - L_{90})^2}{60} \quad (5.2)$$

- Niveles Sonoros Equivalentes diurnos (NED) y nocturnos (NEN). Son los niveles sonoros equivalentes correspondientes a los períodos diurno (07:00 – 22:00 horas) y nocturno (22:00 – 07:00 horas).
- Nivel Día/Noche. Este índice se define como un nivel sonoro continuo equivalente durante un período de 24 horas, añadiendo una corrección de 10 dB a los niveles sonoros de la noche (22:00 – 07:00 horas) a fin de considerar el aumento de molestias producido por el ruido durante dichas horas. Esto se puede expresar mediante la ecuación:

$$L_{dn} = 10 \log \frac{1}{24} \left(1510^{L_d/10} + 910^{(L_n+10)/10} \right) \quad (5.3)$$

donde:

L_d = L_{eq} para el período de día (07:00 – 22:00 horas)

L_n = L_{eq} para el período de noche (22:00 – 07:00 horas)

5.3 FUENTES DE RUIDO EN LOS DIFERENTES TIPOS DE VEHÍCULOS

Dentro del ruido de tráfico se puede establecer que el motor es el primer foco de ruido de los vehículos, radiando el ruido generado por las explosiones y mecanismos internos, a través de su estructura.

El segundo foco de ruido, es el escape de los gases procedentes de la combustión, aminorado en mayor o menor proporción por los silenciadores con que van equipados obligatoriamente los vehículos.

Estos dos focos de ruido del vehículo son independientes de que éste último se halle en movimiento o estacionario y en ambos casos (motor y escape) el ruido está directamente relacionado con la velocidad de giro del motor.

Estudios detallados en bancos de prueba de motores, indican que el nivel sonoro del motor de gasolina aumenta según N^{4-5} , siendo N la velocidad del motor en r.p.m., mientras en el caso del motor diesel esta relación es de N^3 .

Cuando el vehículo está en movimiento junto a los dos focos sonoros anteriormente citados, hay que considerar la interacción de los neumáticos con el firme, el ruido procedente de la transmisión, el ruido aerodinámico del vehículo, el generado por los sistemas auxiliares (sistema de frenos, bombas, ventiladores, etc.) y del estado del firme.

El ruido por el paso de un vehículo, es, pues, la suma de toda esta serie de fuentes sonoras; sin embargo, experimentos controlados demuestran que existen unas pocas, que son las dominantes en cada tipo de vehículo y en cada régimen de conducción.

A velocidades bajas y medias, el motor y el escape son los dos focos sonoros dominantes en todos los vehículos. Para vehículos ligeros y a velocidades superiores a los 80 Km./h, la interacción de los neumáticos con el firme se une a las dos anteriores con un nivel similar, para pasar a ser dominante a partir de los 100 Km./h. En el caso de vehículos pesados, motor y escape mantienen su dominio sobre el resto de las fuentes, en todo el régimen de marcha, salvo en el caso de los camiones con remolques articulados y 12 ó 14 neumáticos en los que a altas velocidades o con firmes mojados puede igualmente dominar el ruido de los neumáticos.

El ruido generado por los neumáticos se hace más significativo con el firme húmedo que con el firme seco, como indica la Figura 5.2.

Si con el vehículo estacionario, el ruido emitido aumentaba con la velocidad de giro del motor, con el vehículo en movimiento esa variación es notablemente distinta según se trate de vehículos ligeros o pesados; en este último caso, dado el peso del vehículo, es casi necesario mantener el motor cerca del máximo de potencia en todo el régimen de conducción, por lo que la variación del nivel sonoro con la velocidad del vehículo es menor que la encontrada para los vehículos ligeros.

La Figura 5.3, presenta la variación de ese nivel sonoro con la velocidad del vehículo, para un automóvil y un camión con la velocidad controlada.

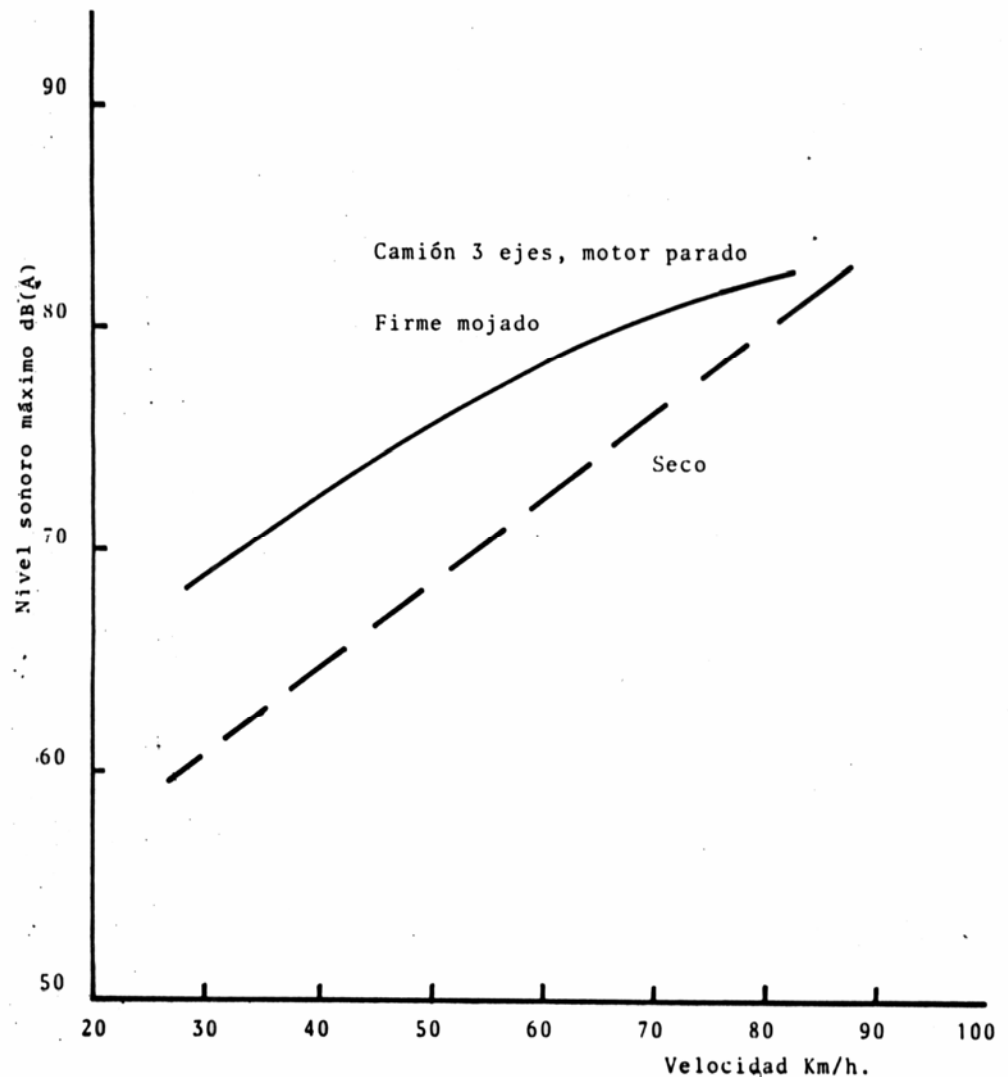
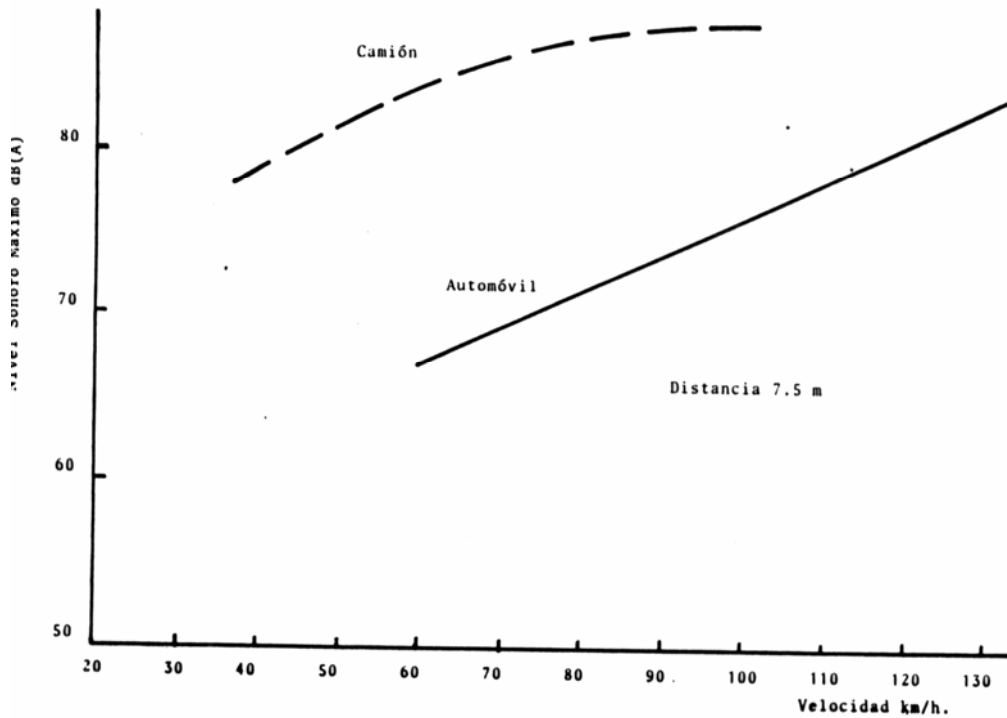


FIGURA 5.2 EJEMPLO DEL ESTADO DEL FIRME EN EL RUIDO DE LOS NEUMÁTICOS

Si se realiza un análisis en frecuencia de la firma sonora de los distintos vehículos, es posible identificar la zona de frecuencias bajas con el ruido del escape y del motor, la de frecuencias medias con el motor y las frecuencias altas con el ruido generado por la interacción de los neumáticos con el firme y en menor medida con el escape.

FIGURA 5.3 VARIACIÓN DEL NIVEL SONORO CON LA VELOCIDAD



La Figura 5.4, presenta el espectro típico del ruido generado por automóviles, vehículos comerciales ligeros y comerciales pesados, así como el de las pequeñas motocicletas con silenciador modificado. Igualmente la Figura 5.5, presenta la variación del espectro de un automóvil con la velocidad mientras que la figura 5.6, presenta esa variación para cada banda de frecuencias.

FIGURA 5.4 ESPECTROS CARACTERÍSTICOS DE DIFERENTES TIPOS DE VEHÍCULOS

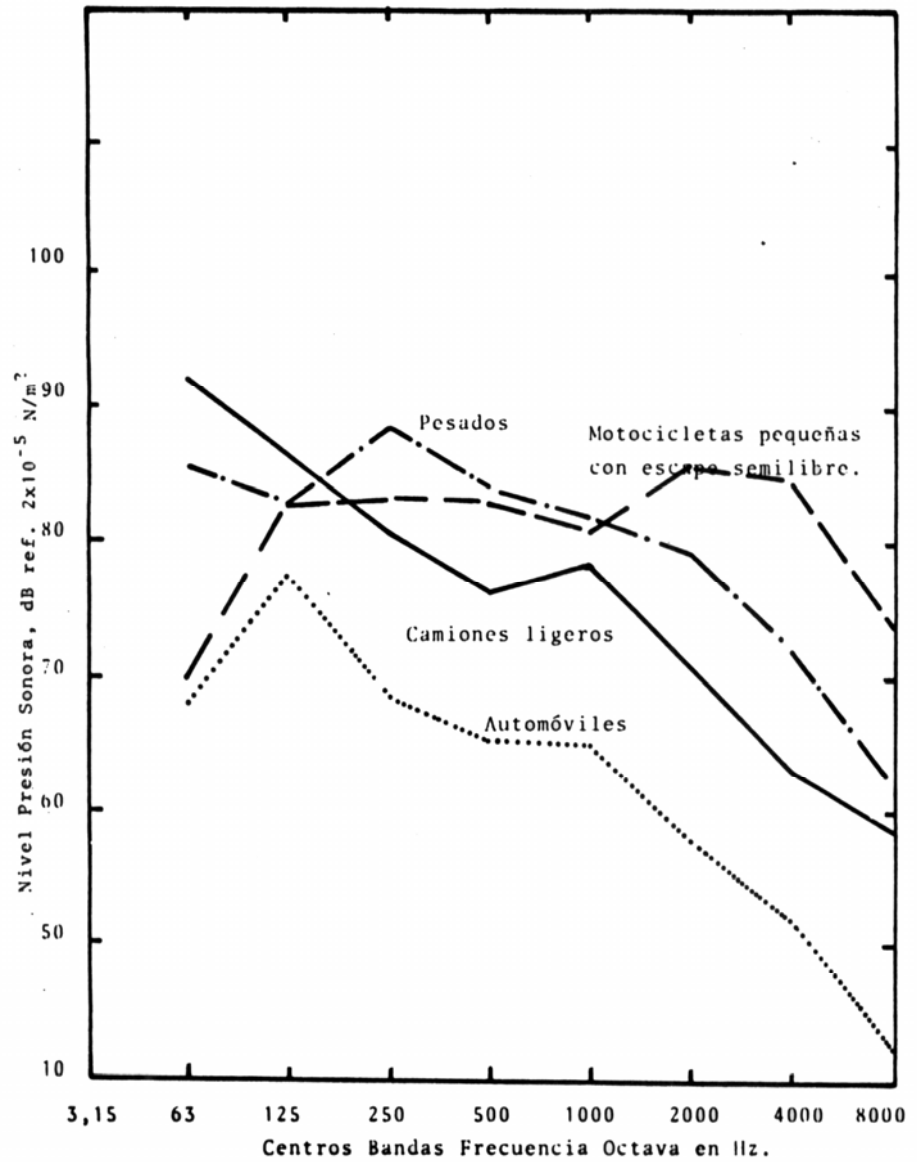


FIGURA 5.5 ESPECTROS DEL RUIDO DE UN AUTOMÓVIL A DISTINTAS VELOCIDADES

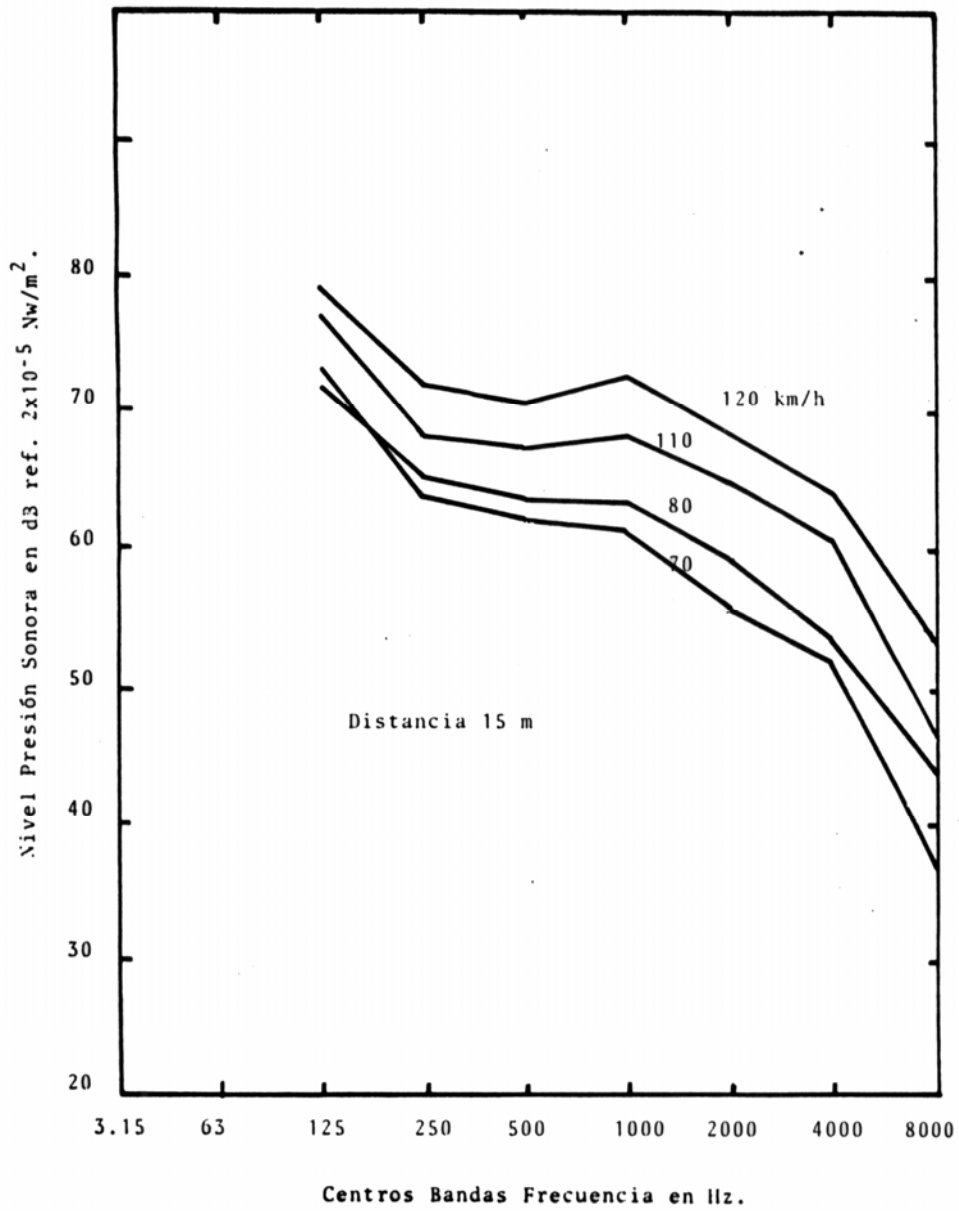
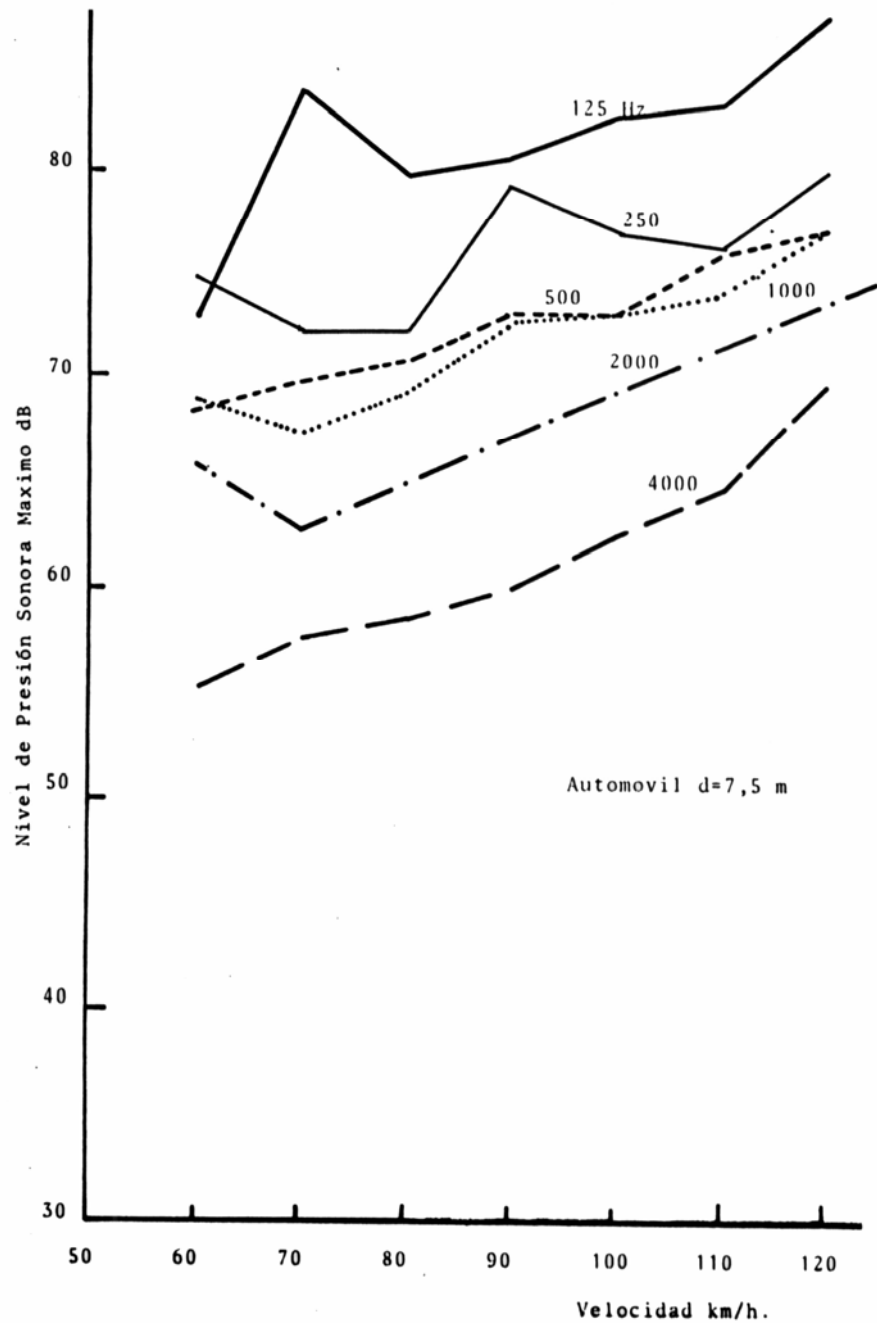
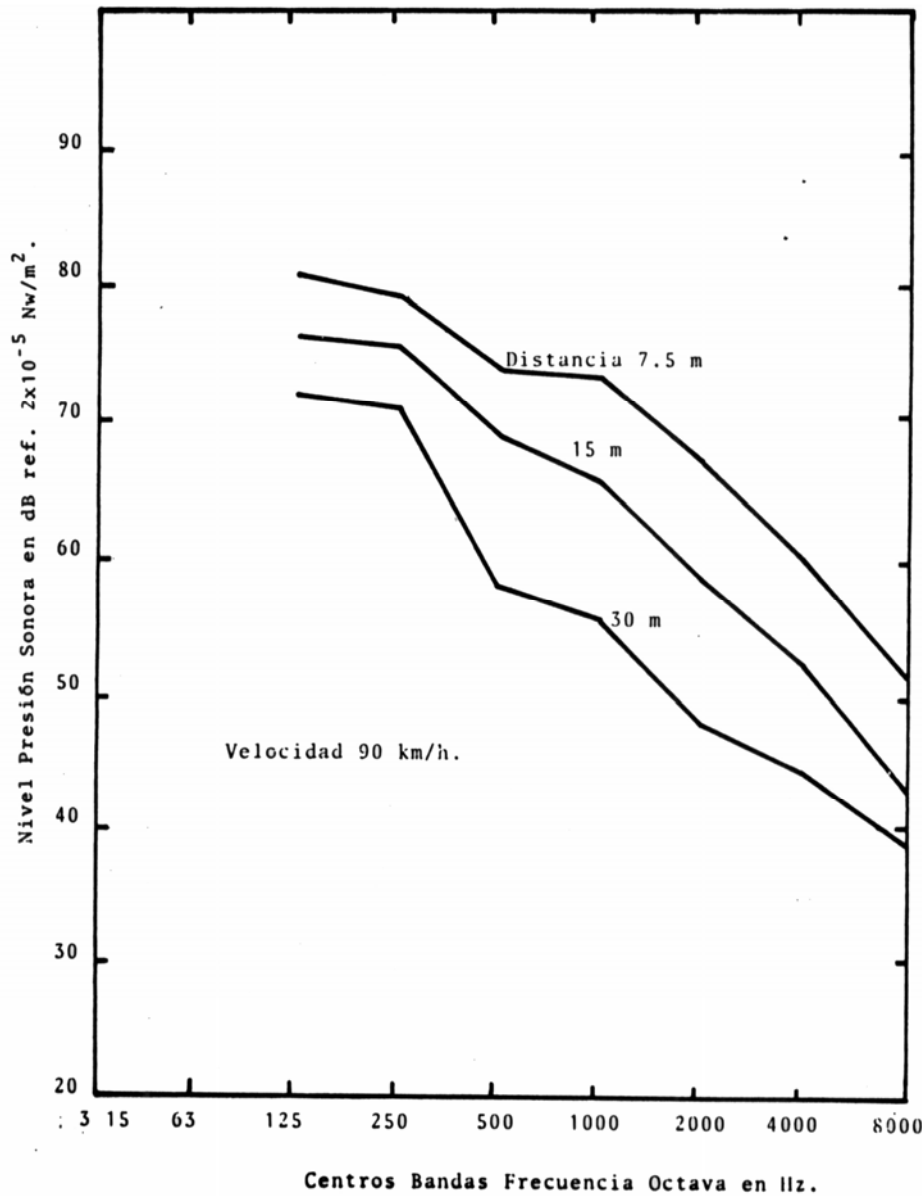


FIGURA 5.6 VARIACIÓN DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA EN BANDAS DE FRECUENCIA CON LA VELOCIDAD



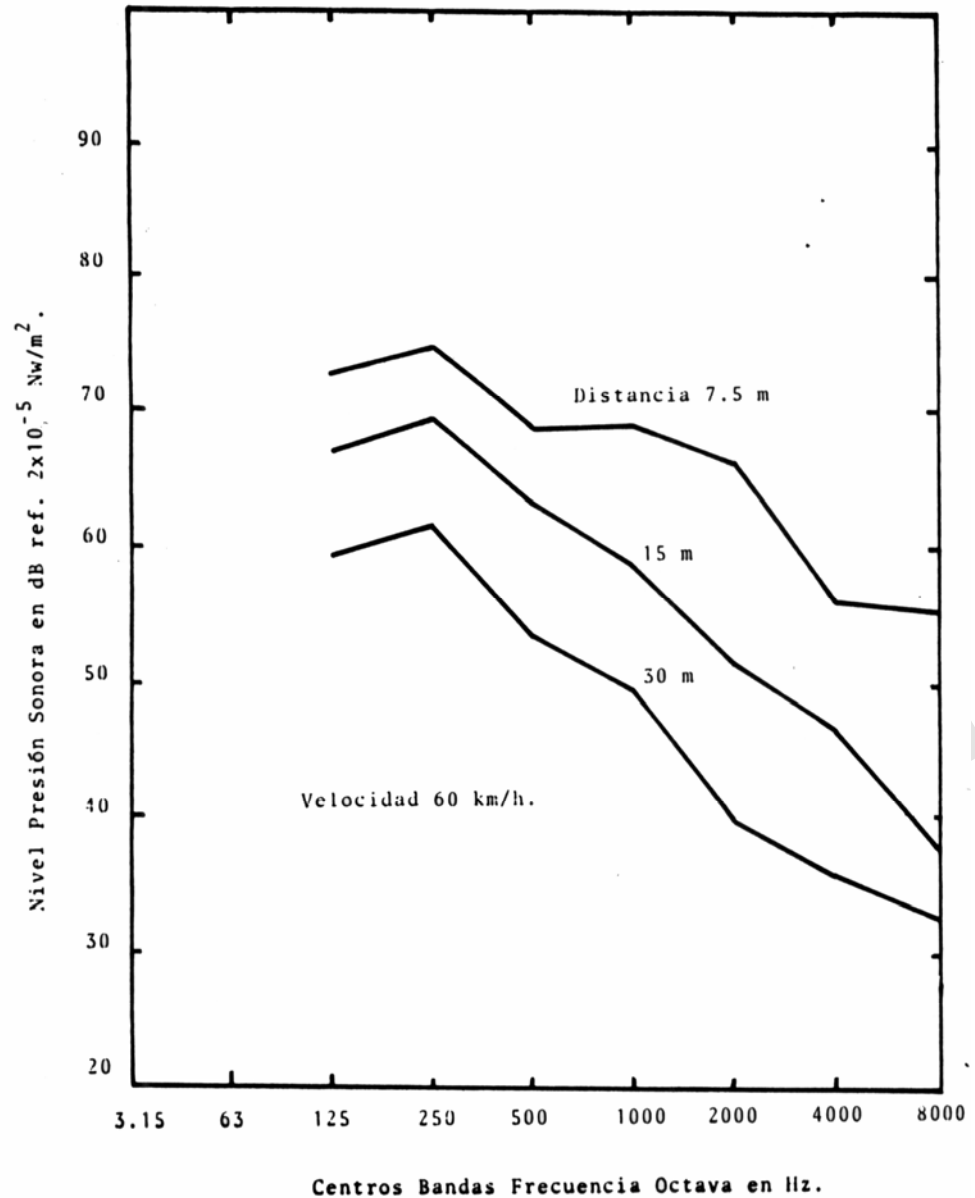
Finalmente las Figuras 5.7 y 5.8, muestran el espectro del paso de un mismo automóvil a dos velocidades y a tres distancias distintas.

FIGURA 5.7 ESPECTROS DEL PASO DE UN AUTOMÓVIL A UNA VELOCIDAD Y TRES DISTANCIAS DISTINTAS



El desplazamiento del vehículo sobre distintos tipos de firme, afecta el nivel sonoro generado por el vehículo. Para un mismo tipo de neumático las diferencias entre el tipo de firme menos ruidoso (asfalto liso) y el más ruidoso (hormigón rayado) alcanzan hasta 11 dB(A).

FIGURA 5.8 ESPECTRO DEL PASO DE UN AUTOMÓVIL A UNA VELOCIDAD Y TRES DISTANCIAS DISTINTAS



Normalmente en situaciones urbanas el ruido de los neumáticos no es importante, salvo en el caso de las calles en las que subsiste el adoquinado. En este último caso, el incremento sobre el firme del asfalto no suele superar los 2 dB(A).

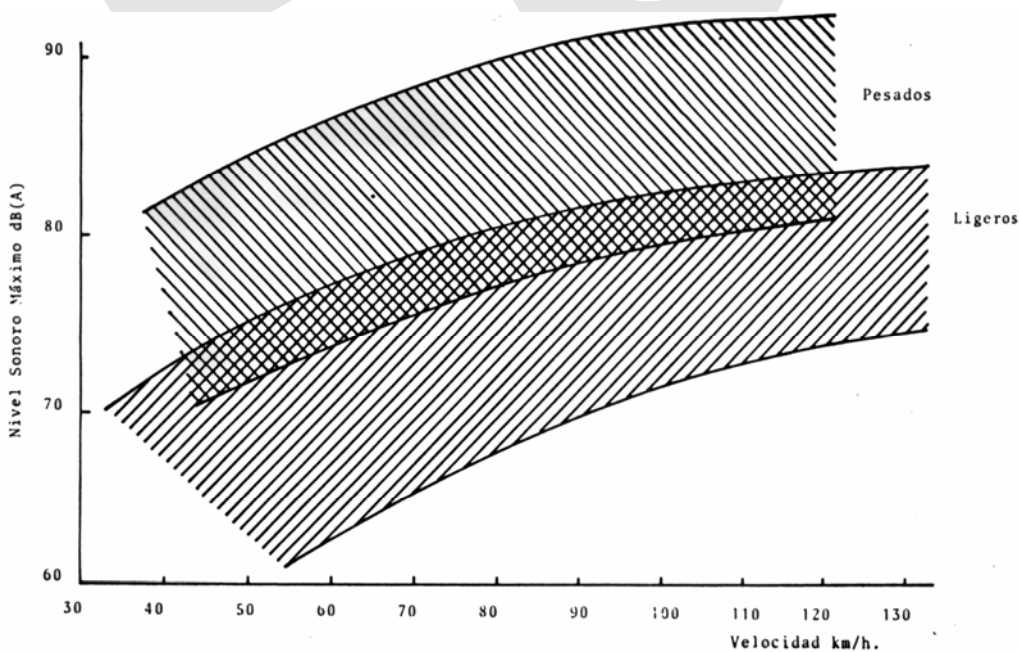
Finalmente, el régimen de conducción del vehículo influye notablemente en el ruido generado. En situaciones urbanas, los vehículos siguen un régimen de marcha con aceleraciones y deceleraciones secuenciales; el paso de un vehículo en una marcha corta y acelerando es naturalmente más ruidoso que el paso del mismo vehículo a la misma velocidad, pero en una marcha larga (menos r.p.m. del motor).

Los parámetros que influyen significativamente en el ruido generado por una vehículo pueden, pues, resumirse en:

- Tipo de vehículo
- Velocidad del mismo
- Régimen de conducción
- Tipo de firme
- Estado de conservación

Todos estos factores hacen que los niveles sonoros máximos generados por los vehículos sean muy amplios dentro de un mismo grupo incluso, dentro de un mismo tipo de vehículo. La Figura 5.9 presenta los márgenes de variación del Nivel Sonoro máximo con la velocidad, para vehículos ligeros y pesados.

FIGURA 5.9 VARIACIÓN REAL DE LOS NIVELES SONOROS CON LA VELOCIDAD EN SITUACIONES INTERURBANAS Y URBANAS



5.4 RUIDO DE TRÁFICO EN VÍAS DE CIRCULACIÓN RÁPIDA

El ruido de tráfico generado por una vía de circulación, es la suma de los niveles sonoros variables generados por los distintos vehículos que forman dicho tráfico.

Si la intensidad de tráfico en una carretera es baja, la distancia media entre vehículos es grande, con notables períodos de tiempo durante los cuales el ruido se mantiene constante o casi constante, en el nivel de fondo.

A medida que la intensidad de tráfico aumenta, la distancia media entre vehículos disminuye y cada vez se escucha menos el ruido de fondo. En este caso podría llegarse a la situación ideal de un tráfico tal que cuando el ruido generado por un vehículo disminuye hasta el ruido de fondo, comienza aumentar el nivel de nuevo por acercarse el siguiente vehículo. A este tráfico correspondería la máxima variación del nivel sonoro con el tiempo. Esta variación continuo del nivel sonoro con el tiempo es la característica más destacada del ruido de tráfico.

Para todo tráfico superior a ese valor ideal, el nivel sonoro ambiente estaría dominado completamente por el tráfico de la carretera ya que incluso el ruido de fondo estaría causado por éste. Los vehículos comienzan a interferir acústicamente, pudiéndose alcanzar tal intensidad que el nivel de ruido fuera prácticamente constante con el tiempo.

En este último caso, la carretera podría asemejarse a una fuente lineal caracterizada por una cierta potencia acústica por unidad de longitud, en contraste con la fuente puntual con la que se había idealizado un vehículo individual.

En realidad estas situaciones ideales aquí descritas sólo son aproximables en los dos casos extremos de muy baja y de muy alta intensidad de tráfico.

Lo que ocurre en realidad para tráficos intermedios, es un agrupamiento de vehículos, que hace que existan momentos durante los cuales el ruido de fondo no está generado por el tráfico de la carretera mientras que durante otros el nivel sonoro es superior al esperado, si no ocurriesen dichos agrupamientos. Esto es en gran parte debido al carácter aleatorio del tráfico, tanto en presencia de vehículos en un punto de la carretera como en la composición de los mismos. Esto hace que las variaciones del nivel sonoro sean aún mayores en estos casos.

Estas continuas variaciones del nivel con el tiempo son debidas a:

- El carácter aleatorio del tráfico en calles y carreteras
- La existencia en el tráfico de vehículos con muy distintas características mecánicas y con distinta emisión de ruido.
- La distinta velocidad de los vehículos, directamente relacionada con la emisión sonora.
- La influencia de la forma de conducción
- El estado de conservación del vehículo.
- La fluidez del tráfico
- La pendiente de la carretera o autopista
- Las condiciones de propagación sonoras desde la vía de circulación al observador
- El trazado de la carretera y el estado del firme.

5.4.1 EFECTOS DEL TIPO DE SUPERFICIE

Al describir las fuentes de ruido de tráfico, se identificó la interacción neumático/firme de la carretera como la fuente dominante a velocidades elevada (superiores a 80 Km./h). Naturalmente la contribución de esa fuente al ruido total es una función tanto del firme como del tipo de neumático.

De forma general se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- La influencia del tipo de pavimento en el ruido generado por los neumáticos, es debida a las características geométricas (macroscópicas y microscópicas) del firme.
- Los pavimentos flexibles (capas bituminosas sobre una base rígida), son menos ruidosas que los pavimentos rígidos (losas).
- El pavimento asfáltico liso, es el menos ruidoso seguido por el de cemento gastado por el uso. Para un mismo tipo de neumáticos, las diferencias encontradas entre el menos ruidoso (asfalto liso) y el más ruidos (hormigón rayado) alcanzaban los 11 dB(A).
- Las diferencias entre neumáticos sobre un mismo tipo de firme es siempre menor que las diferencias entre tipos de firme, para un mismo neumático.

- La longitud de onda media de la rugosidad del pavimento superior a 10 mm, incrementa el ruido generado por los neumáticos.
- La presencia de rayado en el pavimento aumenta, en general, el nivel sonoro generado por los neumáticos (del orden de 4 a 11 dB(A)).
- El ruido generado por los neumáticos aumenta al disminuir la presión de los mismos, dado que aumenta el área de contacto.
- Las condiciones para un pavimento seguro (con suficiente fricción y drenaje) no son contrarias en principio, a las exigidas para un pavimento poco ruidoso.

5.4.2 EFECTOS DE RAMPA

Cuando un vehículo al circular por una carretera horizontal, alcanza un tramo con una pendiente determinada, para mantener la velocidad es necesario aumentar la potencia del motor, aumentando la velocidad de giro del mismo, reduciendo a una marcha más corta.

En esos tramos la fuente dominante del ruido del vehículo es el motor y el escape; el ruido generado por el motor es función directa de su velocidad de giro, por lo que el aumento en el nivel de ruido máximo generado por el paso de un vehículo en un tramo de rampa, respecto al generado en un tramo horizontal sería debido exclusivamente al incremento en la potencia del motor (incremento en r.p.m.).

Para automóviles, este efecto no es pronunciado por dos razones: en primer lugar, por su mayor relación potencia motor/peso del vehículo, no se ven obligados a incrementar notablemente la potencia del motor para salvar la rampa y en segundo término a velocidades altas el ruido de los neumáticos es superior al del motor por lo que el ruido de ambas fuentes (neumáticos y motor) se compensan.

En el caso de los vehículos pesados, su baja relación potencia motor/peso del vehículo, les obliga a incrementar la potencia del motor que hace que el nivel sonoro máximo, aumente ligeramente (normalmente el aumento no es superior a 5 dB(A), incluso a pendientes elevadas).

5.5 BARRERAS ACÚSTICAS NATURALES Y ARTIFICIALES

Accidentes geográficos naturales o artificiales (paredes y muros construidos a lo largo de carreteras y autopistas) constituyen barreras acústicas que pueden incrementar la reducción sonora en determinadas zonas próximas a ellas respecto a los niveles sonoros que tendría en su ausencia. De hecho las barreras artificiales debidamente diseñadas, son elementos de reducción del ruido de carreteras y autopistas ampliamente utilizados en diversos países.

La eficacia de una barrera depende, hasta un determinado límite, de la diferencia de caminos recorridos por el rayo directo y el difractado por la barrera, así como de la longitud de onda del sonido. A frecuencias bajas (longitudes de onda largas) una barrera de pequeñas dimensiones es prácticamente ignorada por el sonido. Dado que el efecto de una barrera es crear una sombra acústica detrás de la misma, solamente las zonas de sombra se beneficiarán, mientras que por otro lado, es posible incrementar el nivel sonoro en la zona de la fuente por reflexión sonora de la barrera, a menos que ésta sea absorbente.

En el caso de carreteras, las barreras acústicas son eficaces siempre que sus dimensiones longitudinales sean adecuadas a la zona que se quiere proteger; por otra parte, son totalmente ineficaces cuando se trata de proteger edificaciones en altura.

Para una línea de fuentes sonoras (vía de tráfico), la Figura 5.10, presenta la atenuación ofrecida por una barrera en términos del L_{eq} en dB(A), en función de la diferencia de caminos recorridos por un rayo sonoro y para una barrera de longitud "infinita", esto es, lo suficientemente larga para cubrir toda la carretera o carril del tráfico.

La Figura 5.11, presenta el efecto de aumentar las dimensiones transversales del tope de la barrera, en la eficacia de la misma. Esto indica que para una misma altura de barrera, una barrera de tierra es siempre más efectiva que una simple pared vertical, aunque en muchas ocasiones se recurre a instalar estas segundas debido a problemas de espacio.

La atenuación de una barrera está limitada además de por su longitud, por la difracción de los bordes de la misma así como la transmisión sonora "a través" de la misma. Igualmente la eficacia de una barrera se ve ligeramente disminuida por la presencia de una barrera similar en el lado opuesto ya que se presentan fenómenos de reflexión de las ondas sonoras; este último efecto puede reducirse inclinando las barreras hacia el exterior de la calzada o incorporando absorción acústica a la paredes interiores de las barreras.

FIGURA 5.10 ATENUACIÓN SONORA DEL RUIDO DE TRÁFICO POR UNA BARRERA

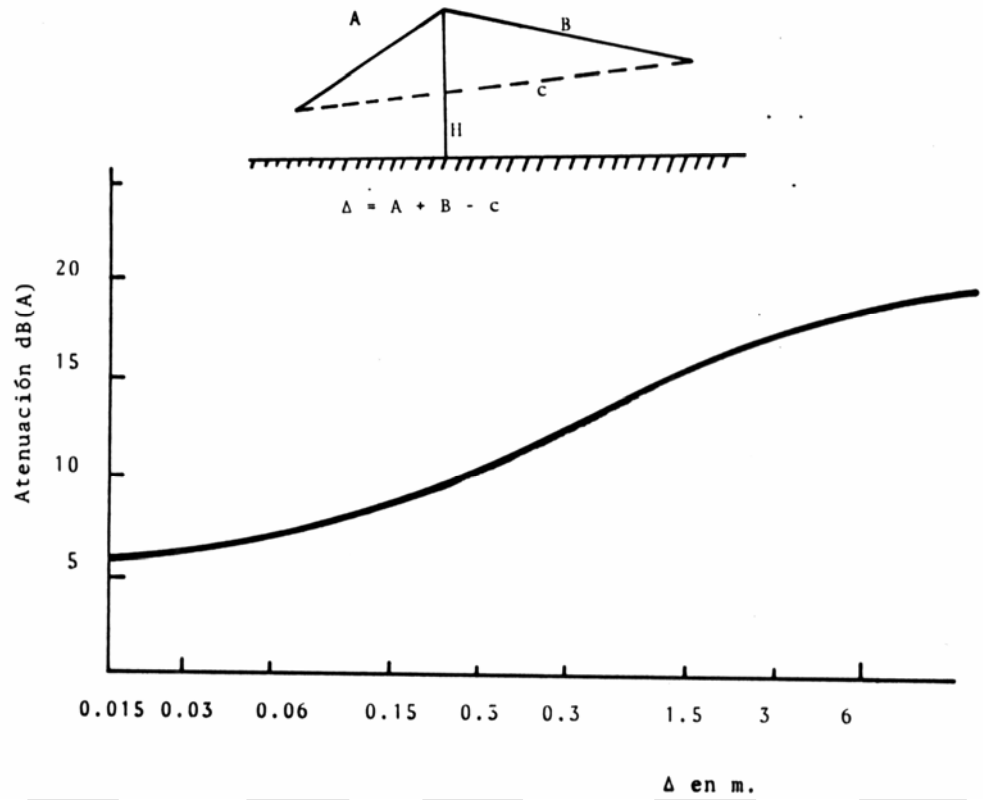
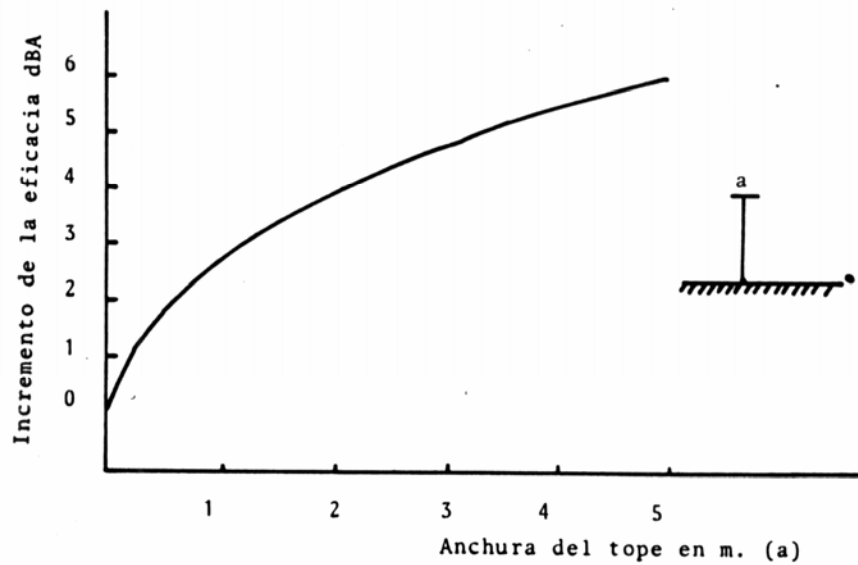


FIGURA 5.11 INCREMENTO DE LA ATENUACIÓN DE UNA BARRERA AL AUMENTAR LA ANCHURA DEL TOPE



El diseño y cálculo de la eficacia de una barrera no es una labor sencilla, máxime cuando se trate de cumplir unos límites sonoros específicos, debido a su limitada longitud, su situación frente a la carretera, la presencia de huecos o grietas, el tipo de material a utilizar y sobre todo su influencia en el tráfico (seguridad en la conducción).

En la práctica es relativamente fácil, con un diseño experto, conseguir atenuaciones de 10 dB(A) con barreras acústicas; conseguir atenuaciones de 15 dB(A) depende mucho de la geometría de la carretera y de la zona a proteger y es prácticamente imposible alcanzar atenuaciones que superen los 20 dB(A).

La construcción de una carretera en trinchera ofrece ya un efecto barrera muy ventajoso dado que se realiza en el momento de la construcción; en el caso de carreteras elevadas sobre puentes o viaductos, el efecto barrera se limita a la zona inmediatamente cercana e inferior a la carretera.

5.6 TRÁFICO URBANO

El tráfico urbano se caracteriza por que las velocidades son bajas y medias con vehículos en marchas cortas y motores a altas revoluciones dominando claramente el ruido del motor y del escape. Normalmente tanto automóviles como vehículos pesados viajan en régimen cercano a máxima potencia y consecuentemente de máximo nivel sonoro elevado. Igualmente se producen una serie de aceleraciones y desaceleraciones, con períodos de movimiento fluido y otros estacionarios.

5.6.1 Propagación en zonas urbanas: Efecto cañón

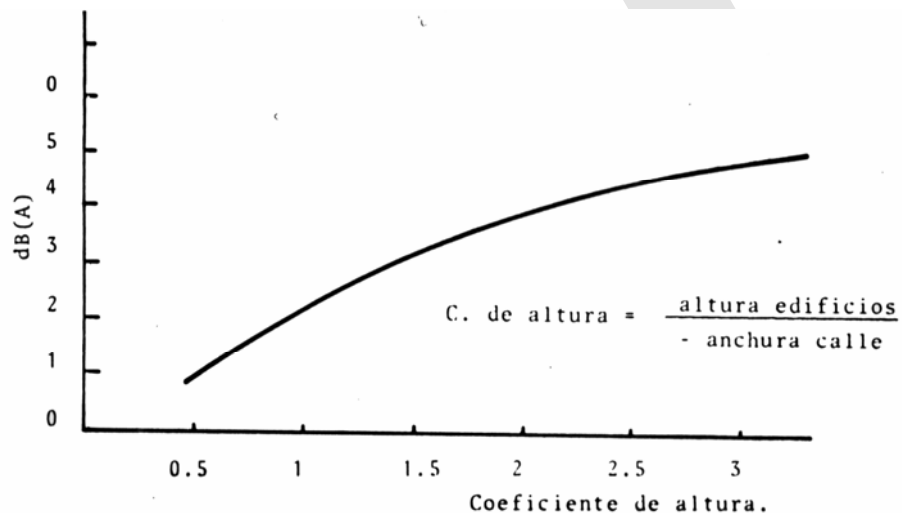
La propagación del sonido en zonas urbanas no es más que una extensión del efecto de la presencia de dos barreras paralelas (edificios) situadas a ambos lados de la calzada, esto se conoce como “efecto cañón”.

En efecto, los edificios en zonas urbanas no son más que grandes barreras que, a la vez que reducen notablemente los niveles sonoros en su parte posterior, reflejan el ruido de nuevo hacia la calzada, de forma que se crea un espacio semireverberante entre los edificios, sobre todo si la separación entre ambos no es muy grande, evitando una disminución rápida de los niveles sonoros del tráfico.

El efecto primordial consiste en la casi uniformidad de los niveles con la altura (siempre y cuando se esté por debajo de la altura de los edificios) y en el caso de calles con coeficiente de altura grandes (altura de los edificios/anchura de la calle o distancia entre fachadas) se produce un incremento notable de los niveles de ruido, respecto a la situación sin edificios.

Este incremento el campo sonoro es función únicamente del coeficiente de altura y sólo se produce en aquellos puntos situados entre fachadas; para coeficientes de altura de 0.5, 1, 2 y 3 la influencia de los edificios se traduce en un incremento de los niveles sonoros equivalentes de 1, 2, 4 y 5 dB(A) respectivamente (Figura 5.12).

FIGURA 5.12 CORRECCIÓN POR COEFICIENTE DE ALTURA DE EDIFICIOS EN CALLES



5.7 PREDICCIÓN DE LOS NIVELES DE RUIDO GENERADOS POR EL TRÁFICO RODADO

A lo largo de los últimos años se han desarrollado numerosas metodologías tanto empíricas como analíticas para el cálculo de los niveles sonoros generados por el tráfico en carreteras y autopistas a partir de sus características (velocidad media, volumen, vehículos pesados, etc.).

Una de estas metodologías, desarrollada por el Gobierno Francés, está recogida en la "Guide de bruit des transports terrestres. Previsión des niveaux sonores. CETUR". En este documento los procedimientos de cálculo son los siguientes:

a) Vías rápidas

Este modelo califica como vías rápidas, a las autovías, carreteras, bulevares o avenidas tradicionales, entrada en las ciudades y las calles en "L".

El nivel sonoro equivalente Leq que el tráfico por estas vías se puede calcular mediante la expresión:

$$Leq = 20 + 10 \log (Q_l + E_1 Q_p) + 20 \log v - 12 \log \left(d + \frac{l}{3} \right) + 10 \log \frac{\theta}{180}$$

donde:

- Q_l y Q_p = Son respectivamente el caudal de vehículos ligeros y pesados, en vehículos/hora.
- E_1 = Es el factor de equivalente acústica entre vehículos ligeros y pesados.
- v = Velocidad media, Km./h.
- d = La distancia al borde de la vía de tráfico, en metros.
- l = La anchura de la calzada, en metros.
- θ = Ángulo bajo el que se ve la carretera, en grados.

En la aplicación de esta ecuación hay que tener en consideración los siguientes puntos:

- En condiciones de campo libre, el nivel sonoro calculado debe reducirse en 3 dB(A).
- Se entiende por vehículos ligeros aquellos cuyo peso total es inferior a 3.5 T; y por pesados cuando el peso es igual o superior a 3.5 T.

El factor de equivalente E , está definido en función del tipo de vía de tráfico y de su pendiente, mediante la Tabla 5.1.

TABLA 5.1 FACTOR EQUIVALENTE E1

TIPO DE VÍA	PENDIENTE				
	r = 2%	r = 3%	r = 4%	r = 5%	r = 6%
Autovía	4	5	5	6	6
Vía rápida urbana	7	9	10	11	12
Bulevar	10	13	16	18	20

La velocidad media a aplicar dependiendo del tipo de vía, está dada en la Tabla 5.2.

TABLA 5.2I VELOCIDADES MEDIAS, KM./H

TIPO VÍA	VELOCIDAD
Autovía	100
Vía urbana rápida	80
Bulevar	60 - 80

b) Vías urbanas

Se establecen como vías urbanas aquellas en las cuales la relación entre la altura de los edificios y distancia entre sus fachadas será igual o superior a 0,2. En estas vías el nivel sonoro equivalente (Leq) generado por el tráfico está dado por la ecuación:

$$Leq = 55 + 10 \log (Q_l + E_2 Q_p) - 10 \log l + K_h + K_v + K_r + K_c$$

donde:

- Q_l y Q_p = Son respectivamente el caudal de vehículos ligeros y pesados, en vehículos/hora.
- E_2 = Es el factor de equivalente acústica entre vehículos ligeros y pesados.

- I = distancia entre fachadas.
- K_h = Corrección debida a la altura.
- K_v = Corrección debida a la velocidad.
- K_r = Corrección debida a la pendiente de la calle.
- K_c = Corrección debida a intersección de calles.

Para la aplicación de esta ecuación hay que tener en consideración los siguientes puntos:

Se considera vehículo ligero, aquel cuyo peso es inferior a 3.5 T y pesados cuando su peso es igual o superior a 3.5 T.

- El valor de E2 es función de la pendiente de la calle según la Tabla 5.3.

TABLA 5.2I VELOCIDADES DEL FACTOR E2

PENDIENTE %	E2
≤ 2	10
3	13
4	16
5	18
≥ 6	20

- Para alturas sobre el suelo inferiores a 4 metros, la corrección es cero; para alturas superiores el valor de K_h está dado por la expresión:

$$K_h = - \frac{2(h-4)}{l}$$

donde: I es la distancia entre fachadas.

- El valor de la corrección debida a la pendiente de la calle (K_r) es cero cuando dicha pendiente es inferior a 2%. Para pendiente mayores su incidencia se considera en el factor E2 (Tabla 5.3).

- La corrección debido a la velocidad (K_v) es cero cuando esta es inferior o igual a 60 Km./h.; aumento en 1 dB cada vez que dicha velocidad aumenta en 10 Km./h.
- La corrección K_c está determinada por la incidencia del ruido generado por las calles transversales y depende no sólo del valor de éste, sino de la distancia del punto considerado a la intersección de la calle (X) según la expresión: $-(3 + 0.1X)$

6 FERROCARRILES

6.1 INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, el ruido generado por los sistemas de transporte ferroviario, ha sido considerado de poca importancia, si se compara con el generado por los otros sistemas de transporte de masas: el tráfico en calles y carreteras y las aeronaves.

Sin embargo ese grado de importancia relativa está cambiando últimamente debido a:

- El incremento de operaciones en una línea.
- La ampliación de la red ferroviaria, particularmente en zonas suburbanas y urbanas
- Las mejoras en la seguridad del transporte que permite altas velocidades.

Todos estos factores contribuyen sin duda a crear niveles de ruido, en determinadas zonas, caracterizado por pequeños períodos con elevados niveles de ruido coincidentes con el paso del tren, seguidos de períodos más o menos largos de relativo silencio.

Por otra parte, el paso de trenes no sólo genera ruido aéreo, sino que es una fuente importante de vibraciones que transmitidas por vía estructural llegan a edificaciones contiguas, haciendo vibrar particiones y radiando de nuevo ruido.

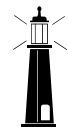
6.2 FUENTES DE RUIDO EN FERROCARRILES

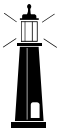
Las fuentes de ruido fundamentales de un tren en movimiento son:

- Ruido de rodaje por la interacción rueda/raíl, que predomina a altas velocidades (superiores a 80 – 90 Km./h.).

El ruido generado por la interacción de la rueda/raíl se suele dividir en tres categorías: “chirridos”, impactos y “rugido”.

El “chirrido” es el término que se usa para describir un ruido de banda estrecha (normalmente unos pocos tonos) asociados a los ferrocarriles en las curvas; este ruido es normalmente de alta frecuencia. Su origen no es





otro que la imposibilidad de los ejes del coche de situarse radialmente en las curvas, de forma que las ruedas además de girar se desplazan lateralmente.

El ruido de impacto es generado cuando las ruedas cruzan juntas o discontinuidades del raíl. El cambio de velocidad vertical de la rueda en estos obstáculos, produce fuerzas importantes sobre raíl y rueda, que radian ruido.

El término rugido o ruido del rodaje es aquel que domina en el desplazamiento del tren sobre un raíl rectilíneo y sin obstáculos. Suele ser un ruido de banda ancha y está generado por las pequeñas rugosidades de ruedas y raíles.

Para frecuencias iguales o superiores a 2.000 Hz los principales contribuyentes son las ruedas, mientras que a frecuencias inferiores la contribución se distribuye entre diversas fuentes (ruedas, raíles, coche, etc.).

Medidas realizadas cerca de líneas férreas demuestran que el ruido r/r (rueda/raíl) depende de la velocidad del vehículo. Normalmente esta dependencia varía entre 20 y 40 $\log v$, implicando que si la velocidad se reduce a la mitad este ruido disminuiría entre 6 y 12 dB.

La introducción de raíles continuos puede reducir el ruido de impactos en 10 dB(A), mientras que el estado de las superficies de raíl y rueda influye entre 10 y 15 dB(A) en el ruido generado.

Otra fuente de ruido asociada a este sistema r/r es el ruido de frenada, debido a la excitación de frecuencias naturales en las ruedas.

- Ruido de propulsión, que predomina a bajas frecuencias

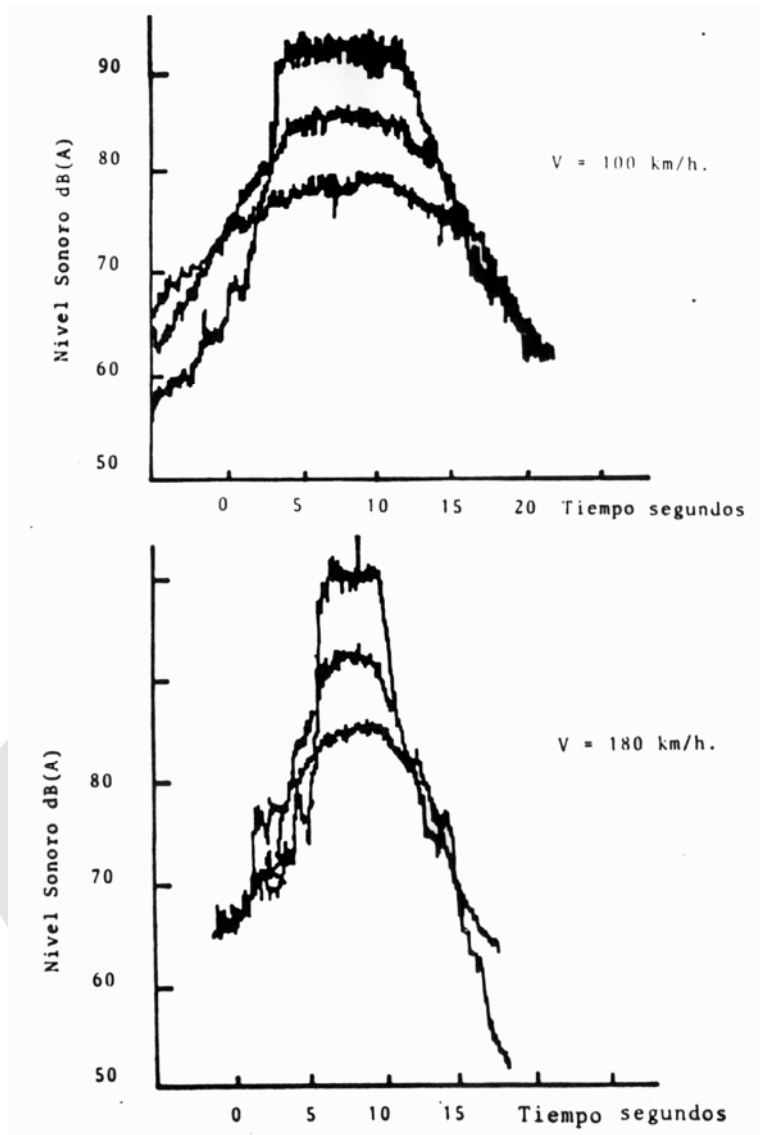
En el caso de locomotoras eléctricas, su ruido sobresale por encima del nivel del tren aunque, los ventiladores de enfriamiento pueden generar contribuciones importantes.

Las locomotoras diesel son algo más ruidosas, particularmente debido a la instalación de pobres silenciadores de entrada de aire y escape de gases.

6.3 DESCRIPCIÓN DEL RUIDO DE TRENES

El paso de un tren genera una variación del nivel sonoro con duraciones que pueden variar entre 10 y 30 segundos a velocidades medias y altas, como puede apreciarse en la Figura 6.1 donde se muestran las firmas sonoras del paso de un tren a distintas distancias para dos velocidades y a distintas distancias a la vía.

FIGURA 6.1 FIRMA SONORA DEL PASO DE UN TREN



La firma sonora de un tren puede especificarse en términos de su nivel sonoro máximo. Por otro lado cerca de una línea de ferrocarril, la posible respuesta comunitaria puede variar en función de la duración de cada suceso y naturalmente en función del número de sucesos, en consecuencia se deberá considerar no sólo los valores máximos, sino la duración del suceso (paso del tren). La Figura anterior muestra que esa duración es función de la velocidad a una determinada distancia.

Una idea de la duración del paso del tren puede venir indicada en función de la duración entre los $L_{\max} - 10$ dB(A), que puede ser aproximada por:

$$\tau = \frac{l}{v} + \frac{6d}{100} \quad (6.1)$$

siendo l la longitud del tren, v la velocidad del tren y d la distancia a la vía (normalmente corta).

Mientras el ruido de tráfico se caracteriza por un número de sucesos grande por unidad de tiempo, el ruido de trenes registra un número mucho menor. La descripción en principio, se debería parecer más al caso del ruido de aeronaves que al de tráfico; según esto en un punto cercano a una línea de ferrocarril el ruido de trenes debería describirse en términos de un descriptor del tipo ruido y número (ruido de un suceso + número de sucesos).

La utilización de índices estadísticos como ocurre en el caso del tráfico, no se ve aconsejada por el hecho de la poca densidad de sucesos.

Sin embargo la utilización del índice L_{eq} , horario diurno ó 24 horas, compagina ambas aproximaciones y parece responder bien a la respuesta comunitaria. Sin embargo, en el caso de que el número de trenes sea muy bajo, sería quizás más aconsejable utilizar el valor máximo L_{max} en dB(A).

Igualmente puede utilizarse alguno de los índices relacionados con el L_{eq} , como el L_{dn} .

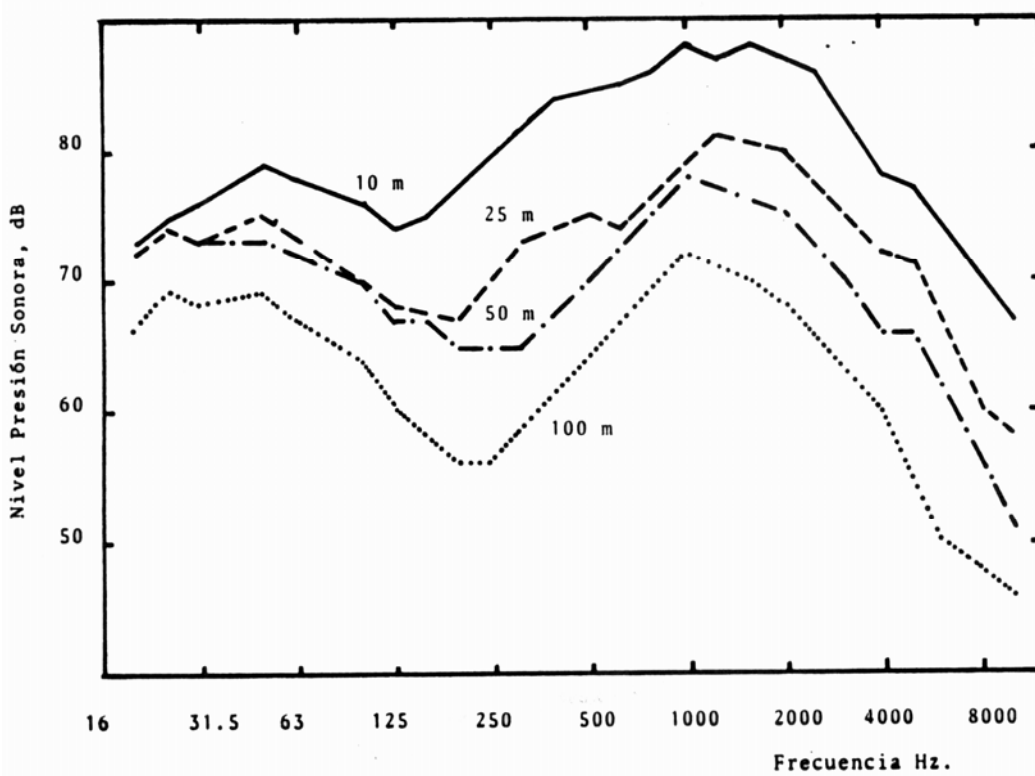
6.4 RUIDO DE TRENES DE SUPERFICIE

Aun cuando el ruido dominante en el paso de un tren es el generado por la interacción r/r , en realidad influyen tantas fuentes que es difícil estimar un nivel de ruido típico. El ruido de tren, de locomotora, de vía, de ejes, de ruedas, el estado de conservación de todo ello, influye notablemente en el ruido generado.

Un análisis en bandas de frecuencia del paso de un tren muestra un espectro con un máximo centrado en las frecuencias altas.

La Figura 6.2 presenta un ejemplo del paso de un tren a 120 Km./h y los espectros correspondientes a distintas distancias.

FIGURA 6.2 ESPECTROS DEL PASO DE UN TREN A 120 KM/H A DISTINTA DISTANCIA



La Figura 6.3 presenta un ejemplo del ruido máximo generado a 25 metros en función de la velocidad, para seis trenes, distintos de una misma compañía férrea. Como puede apreciarse existen variaciones notables que se incrementan si se comparan compañías de distintos países.

En diversos estudios los datos obtenidos para los ferrocarriles resumen la variación del ruido máximo medido a una distancia de 25 metros, en función de la velocidad v a:

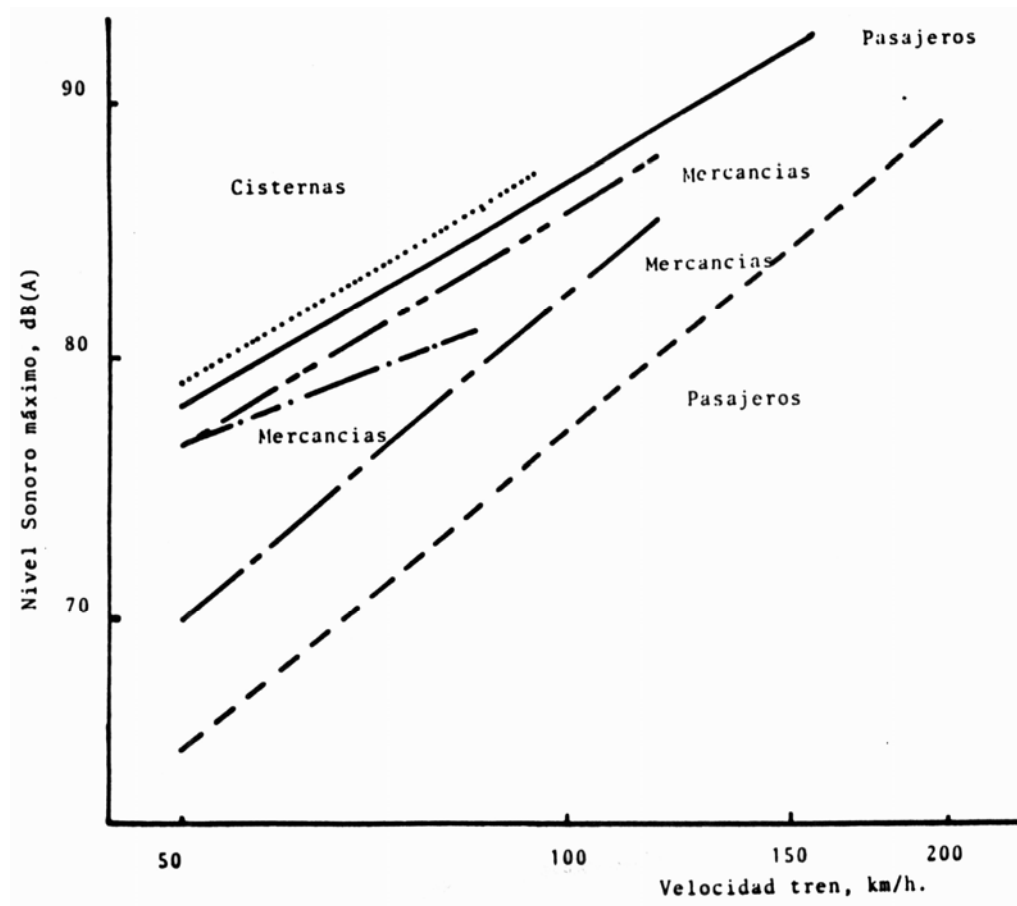
- Para trenes de pasajeros:

$$L_{max} = 30 \log v + 28 \text{ dB(A)} \quad (6.2)$$

- Para trenes de mercancías:

$$L_{max} = 20 \log v + 42 \text{ dB(A)} \quad (6.3)$$

FIGURA 6.3 NIVELES SONOROS MÁXIMOS A 25 M GENERADOS POR EL PASO DE DIVERSOS TRENES (V.K)



Por otra parte, como ejemplo de las posibles variaciones que se pueden encontrar, las Tablas 6.1 y 6.2 presentan las variaciones obtenidas en distintos tipos de vía y en función de la calidad de raíles y ruedas.

TABLA 6.1 VARIACIÓN DEL RUIDO DEL TREN EN FUNCIÓN DEL TIPO DE VÍA

TIPO DE VÍA	VARIACIÓN DB(A)
Raíl continuo + traviesas hormigón + balastro	Referencia
Raíl continuo + traviesas madera + balastro	+ 3
Raíl normal (con juntas) + traviesas madera + balastro	+ 6
Raíl continuo directo sobre losa	+ 8 a + 10

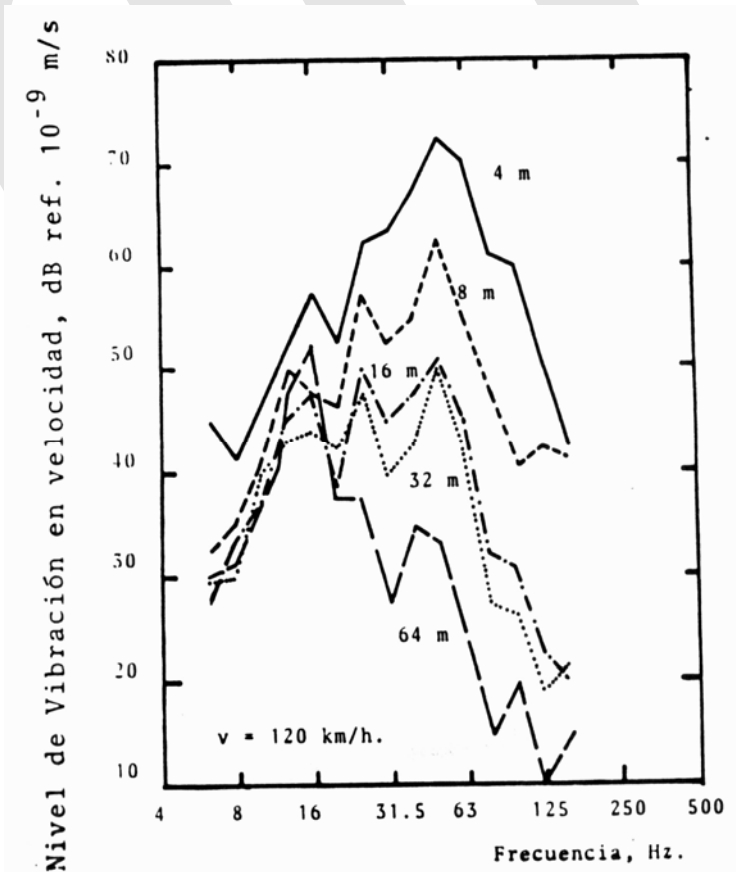
TABLA 6.2
VARIACIÓN DEL RUIDO DEL TREN EN FUNCIÓN DEL ESTADO DE RAILES Y RUEDAS

	VARIACIÓN dB(A)
Raíles: Nuevos o pulidos	Referencia
Mediocre	+ 10
Ondulación típica	+ 15
Ruedas: Nuevas	Referencia
Gastadas	+ 10

Una contribución hasta ahora no contemplada, pero que puede resultar una frecuencia fuente de molestias, es la de los pitidos, que pueden alcanzar niveles sonoros entre 110 y 120 dB(A) a 5 metros.

Finalmente el paso de un tren, genera además de ruido propagado por vía aérea, vibraciones en los soportes de vías y terrenos adyacentes, que se propagan por vía estructural pudiendo afectar a edificaciones cercanas.

FIGURA 6.4 NIVELES DE VIBRACIÓN GENERADOS POR EL PASO DE UN TREN A DISTINTAS DISTANCIAS



En estas últimas, esa vibración puede sentirse (con movimientos de particiones y objetos, etc.) o puede ser transformada en ruido por las paredes en vibración.

La Figura 6.4 anterior, presenta ejemplos de niveles de velocidad verticales medidos a distintas distancias, al paso de un tren a 120 Km./h. El máximo en este caso se producía a 50 Hz.

6.5 MÉTODOS DE PREDICCIÓN

Existen diferentes métodos de predicción de los niveles de ruido generados para el tráfico de ferrocarriles, siendo necesario en todos ellos conocer los parámetros que los caracterizan, esto es, tráfico que soportará la vía, trazado de las mismas, orografía del terreno por donde discurren, etc., entre ellos el desarrollado por el Instituto Nacional de Investigación de Transportes y su Seguridad (INRETS).

En este modelo se establece que el nivel máximo generado por un tren en condiciones de campo libre:

$$L_{max} = L_0 - K \log \frac{d}{d_0} + 30 \log \frac{V}{V_0} - Kd$$

donde L₀, d₀ y V₀ son los valores de comparación, K es el coeficiente de longitud y Kd es el coeficiente de directividad.

Los valores de referencia de los trenes son los que se indican a continuación.

Tipo de Tren	Longitud media (m)	Valores de Referencia			
		K ₀ (m)	V ₀ (Km/h)	L ₀ dB(A)	K
Cercanías	100	25	100	79	16
Metro	75	7,5	60	79	15
Talgo	250	25	200	87	15
AVE	200	25	250	85-87	15
TGV	200	25	270	93-95	15

Mercancias	325	25	100	88	12
Automotor	40	25	120	87	20

El coeficiente de directividad (Kd) depende del ángulo formado por el rayo acústico y el plano horizontal:

Ángulo	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Kd	0	0	0	0	3	4,5	6	7,5	9

Una vez calculado el nivel máximo que genera el paso de cada tipo de tren, se necesitan calcular el tiempo de exposición para posteriormente estimar el nivel equivalente. Una de las expresiones que se puede utilizar es:

$$te = \frac{3,6 * l}{V} + \frac{6 * d}{100}$$

donde:

- l = es la longitud del tren en metros
- V = velocidad del tren en Km./h
- d = distancia del receptor a la vía en metros.

A continuación se calculará el nivel continuo equivalente LAeq(t) de un tren, en función del nivel sonoro Lmax(te) y del tiempo de exposición te, durante un periodo de tiempo T:

$$L_{Aeq}(T) = 10 \log \frac{1}{T} \int_T 10^{\frac{L_{max}(te)}{10}} dt$$

De la misma manera se tendrá en cuenta todos los pasos de los distintos trenes que son objeto del estudio, en cada uno de los períodos de los que se divide las 24 horas del día, por ejemplo, diurno (08:00 – 22:00 horas) y nocturno (22:00 – 08:00 horas).

De forma complementaria al modelo se estudia la propagación del sonido con la distancia en función de las distintas atenuaciones que pueden producirse en el camino entre la vía y el punto del entorno a la vía al que llega el sonido.

Estas atenuaciones comprenden además de la atenuación citada relativa a la distancia, la debida a la vegetación y la debida a barreras naturales formadas por la propia orografía del terreno.

Atenuación debido a la vegetación según la norma ISO 9613-2. La vegetación en general proporciona atenuaciones reducidas. En la tabla siguiente se puede observar la atenuación promediada a través de vegetación variada.

Distancia de propagación a través de la vegetación $10 < d < 20$.

Frecuencia Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Atenuación dB	0	0	1	1	1	1	2	3

Distancia de propagación a través de la vegetación $20 < d < 200$.

Frecuencia Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Atenuación dB	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12

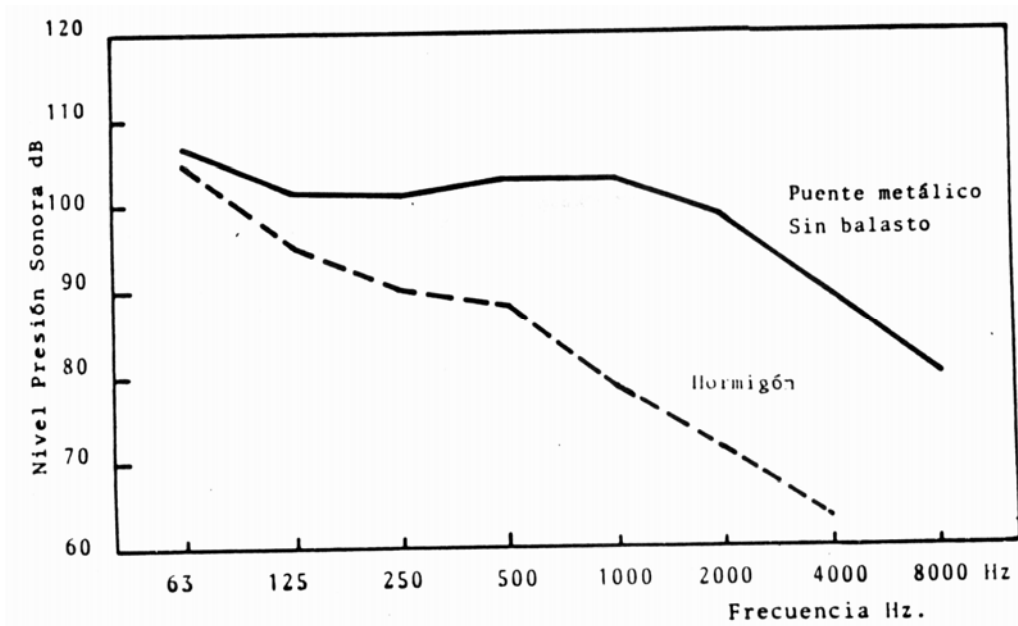
6.6 TRENES ELEVADOS

Trenes circulando sobre vías elevadas, bien sean metálicas o de hormigón, generan normalmente niveles sonoros superiores a los generados en superficies a veces hasta 20 dB(A) superiores debido a que la vibración generada por la interacción r/r es transmitida a la estructura y radiada como ruido directamente al exterior.

La Figura 6.5 presenta un ejemplo del nivel de presión sonora en bandas de frecuencia generados por el paso de un tren, medido directamente abajo de dos tipos de puentes. El primero muestra el paso sobre un puente de hormi-

gón con balastro y el segundo sobre uno metálico abierto, sin balastro. Puede notarse el efecto de una estructura más amortiguada que otra en la radiación sonora.

FIGURA 6.5 NIVELES DE PRESIÓN SONORA GENERADOS POR EL PASO DEL TREN SOBRE DOS PUENTES DISTINTOS



7 TRÁFICO AÉREO

7.1 INTRODUCCIÓN

El tráfico aéreo no es, ni muchos menos, la fuente de ruido ambiental más extendida (de hecho su influencia esta limitada a aquellas zonas cercanas a los aeropuertos), sin embargo en la actualidad, es la fuente sonora que genera mayores niveles de ruido y como consecuencia una mayor molestia a la comunidad afectada por ellos.

Es por esto, por lo que desde los años 60, la temática del ruido generado por el sobrevuelo de las aeronaves en las zonas aeroportuarias, ha merecido internacionalmente especial atención, tanto por parte de las autoridades competentes, como por muy diversos organismos oficiales y privados.

En efecto, por la gran diversidad de las fuentes sonoras existentes en el entorno aeroportuario, el ruido ambiente no tiene carácter único; entre operaciones de despegue y aterrizaje de las aeronaves, se oye e identifica el ruido de tráfico, de una carretera de acceso al aeropuerto o el de equipos industriales por ejemplo, todos de muy distinta naturaleza. Por otra parte en un mismo punto el ruido varía continuamente con el tiempo, con oscilaciones del nivel ambiental que alcanzan varias decenas de dB, sobre un ruido de fondo relativamente constante.

7.2 FUENTES DE RUIDO EN LAS AERONAVES

Es evidente que en el entorno aeroportuario las aeronaves constituyen las fuentes sonoras ambientales más importantes, en sus operaciones de aproximación y despegue.

La evolución de la aviación desde las viejas aeronaves propulsadas a hélice hasta los modernos reactores, han originado así mismo una continua variación de las características físicas (nivel de ruido y contenido espectral) del ruido por ellas generados, así:

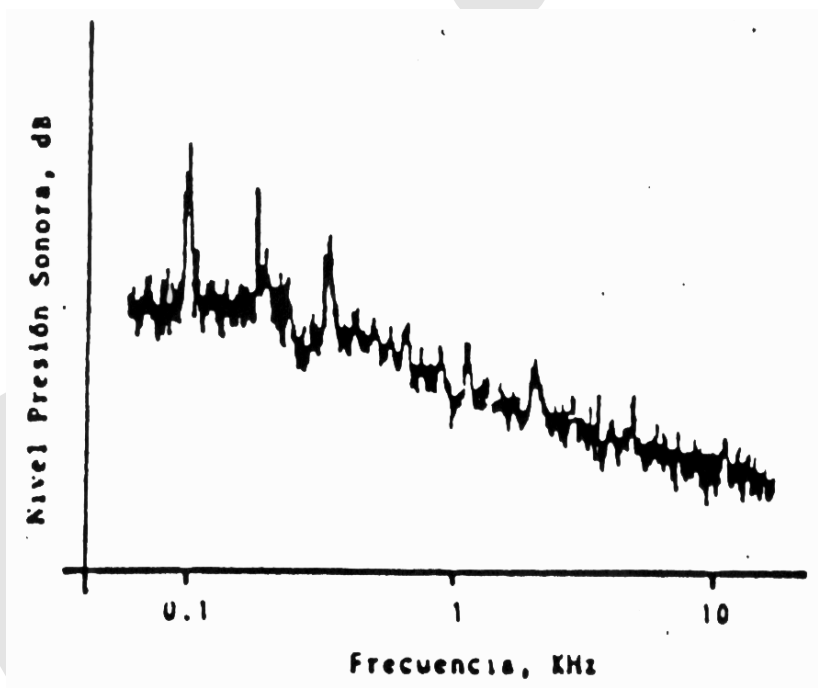
- Motores a hélice

Básicamente las dos fuentes de ruido en este tipo de motores son la hélice y el propio motor; siendo, en la mayor parte de los casos, dominante la

primera de ellas, ya que el empleo de silenciadores del escape y materiales aislantes pueden reducir el ruido generado por el motor.

El análisis espectral del ruido generado por una hélice (Figura 7.1), muestra un ruido de banda ancha con nivel prácticamente constante y, superpuesto, una serie de frecuencias discretas correspondientes al giro de las aspas de la hélice.

FIGURA 7.1 ANÁLISIS ESPECTRAL DEL RUIDO DE UNA HÉLICE



▪ Motores a reacción

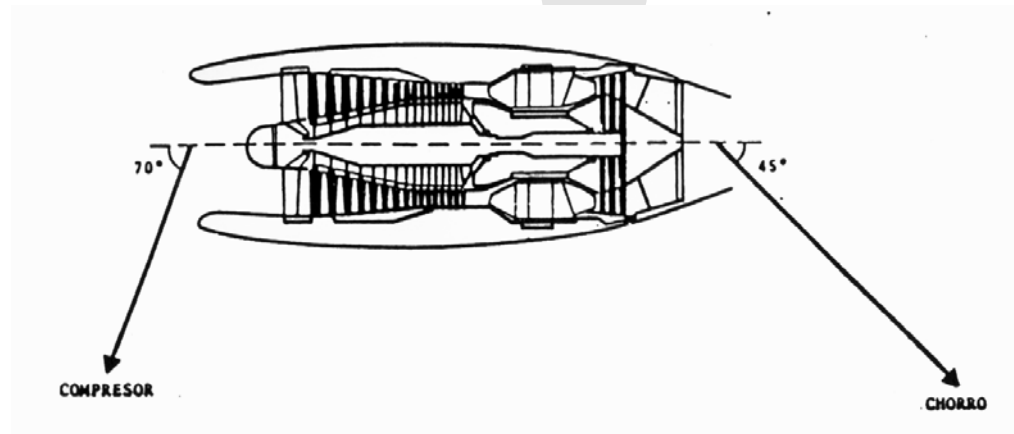
La entrada en servicio de aeronaves equipadas con motores a reacción constituye sin duda el punto de arranque de las protestas comunitarias en las proximidades de los aeropuertos como consecuencia del excesivo nivel sonoro que generan dichas aeronaves en sus operaciones.

La fuente sonora individual de estos motores son las fluctuaciones de presión de carácter aleatorio que se generan al mezclarse turbulentamente los gases a alta velocidad del motor con el aire en calma. La potencia acústica de estas fluctuaciones, varía proporcionalmente a la velocidad de salida de los gases, elevado a las potencias 8 y 9 respectivamente para velocidades subsónicas y supersónicas.

- Turborreactores

Esencialmente un motor turborreactor se compone de un compresor, un sistema de combustión y una turbina, con los correspondientes orificios de entrada y salida de gases (tobera) (Figura 7.2).

FIGURA 7.2 ESQUEMA DE UN MOTOR TURBOREACTOR MOSTRANDO LA DIRECCIONALIDAD DE LAS FUENTES DE RUIDO



Básicamente el aire que atraviesa el compresor para en su totalidad a la cámara de combustión, para ser posteriormente expulsado junto a los gases residuales a alta velocidad, por la tobera. Antes de alcanzar la tobera, los gases atraviesan la turbina que mueve a su vez al compresor inicial.

El ruido procedente de la combustión es aislado por la estructura del motor y el generado por la turbina, radiado por la tobera queda enmascarado por el del chorro.

El ruido procedente del chorro se caracteriza por un espectro de la banda ancha con un máximo a bajas frecuencias (entre 100 y 400 Hz).

El ruido del compresor se caracteriza por su contenido en frecuencias de banda estrecha centradas por encima de los 80 Hz.

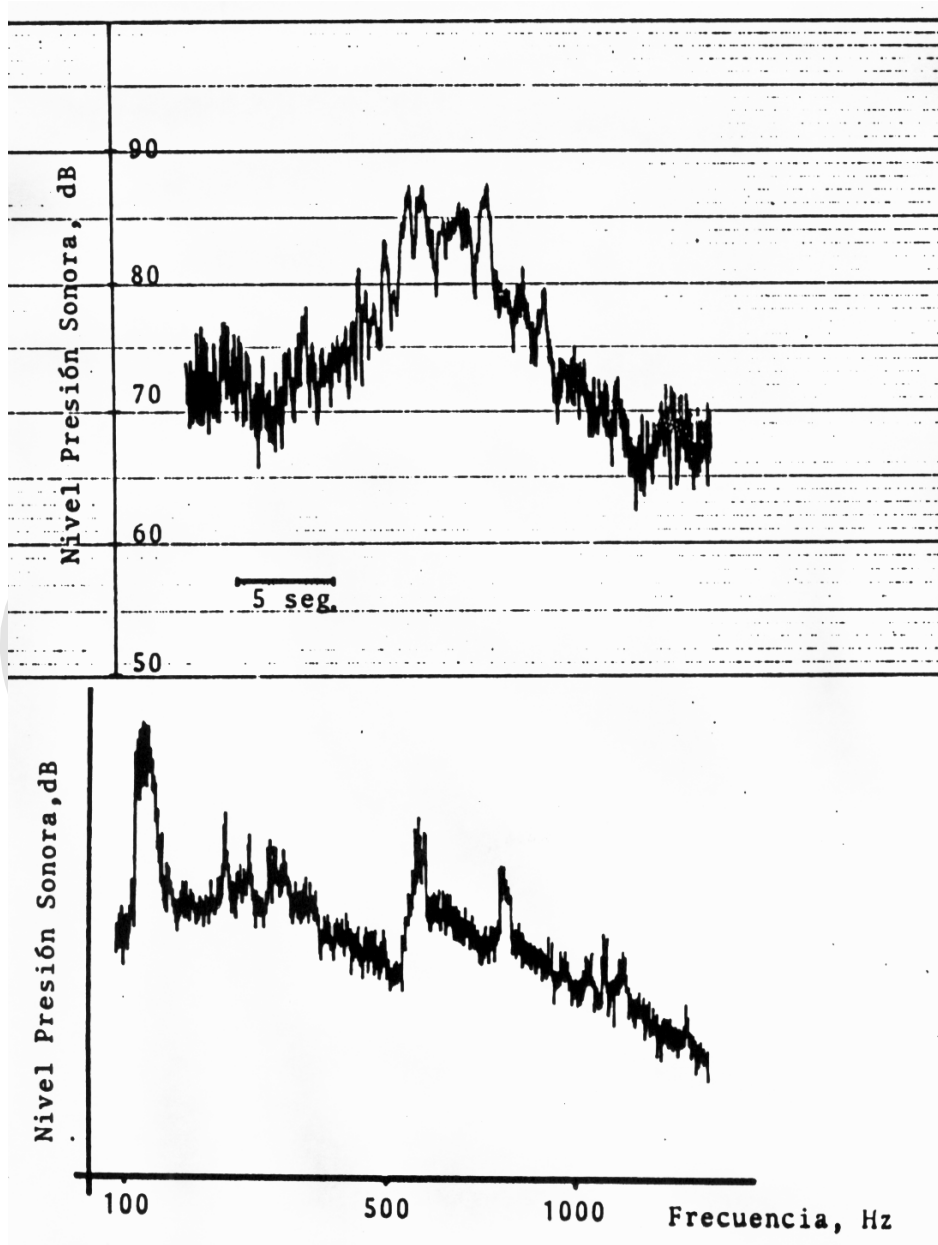
Las aeronaves equipadas con estos motores excesivamente ruidosos han dejado prácticamente de existir en la aviación comercial.

- Turbohélices

Los motores turbohélices son adaptaciones de los motores anteriores, de forma que la turbina no sólo mueve el compresor, sino también la hélice. El espectro (Figura 7.3) tiene frecuencias discretas correspondientes a la

rotación de la hélice, compresor y turbina y un ruido de banda ancha procedente del chorro de gases.

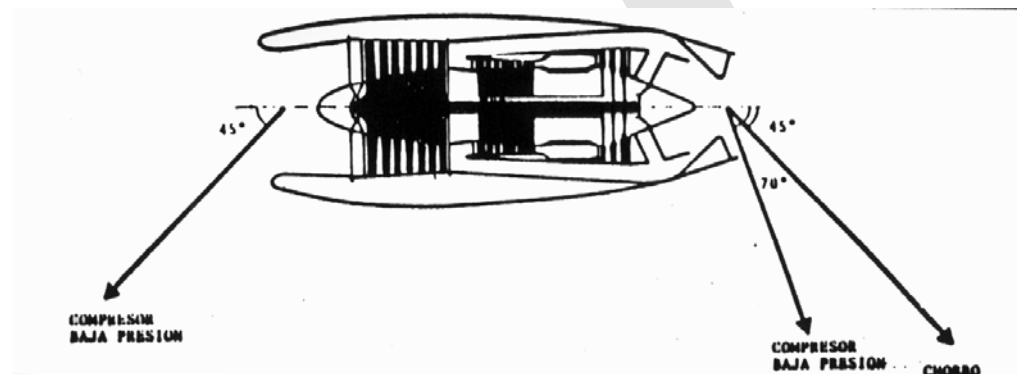
FIGURA 7.3 FIRMA SONORA Y ESPECTRO SONORO DE UNA AERONAVE MOVIDA POR TURBOHÉLICES



- Motores de doble flujo

Estos motores se basan en el principio de que el mismo empuje puede conseguirse acelerando una masa de gas relativamente pequeña, que moviendo una masa mucho mayor a menor velocidad. En consecuencia, parte del aire absorbido por el compresor inicial es desviado a través de un conducto, sin pasar por la cámara de combustión, siendo expulsado junto con los gases procedentes de aquella o bien independientemente (Figura 7.4).

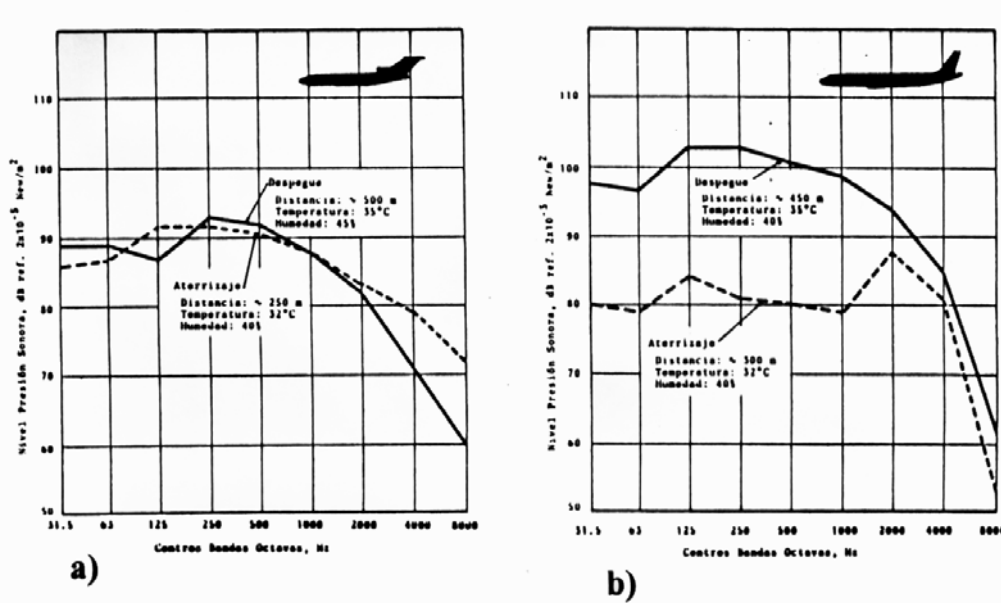
FIGURA 7.4 ESQUEMA Y DIRECCIONALIDAD DEL RUIDO GENERADO POR UN MOTOR DE DOBLE FLUJO Y BPD



La presencia del compresor de baja presión origina un ruido de alta frecuencia que acompaña al ruido del chorro, si bien aquel, en la nueva generación de estos motores, se ha reducido considerablemente mediante la incorporación en los conductos de entrada y salida de materiales absorbentes.

Este tipo de motores de bajo porcentaje de desviación (BPD) siguen considerándose excesivamente ruidosos y equipan un gran número de aeronaves actuales tanto en la versión primera (Boeing 707, DC-8) como en la nueva generación (Boeing 727 y 737, DC-9). En la Figura 7.5 se presentan los espectros típicos del ruido generado por estas aeronaves durante las operaciones de aterrizaje y despegue.

FIGURA 7.5 ESPECTROS EN BANDA DE 1/1 OCTAVA DE LOS MÁXIMOS DE PRESIÓN SONORA CORRESPONDIENTES AL DESPEGUE Y ATERRIZAJE DE a) BOEING 727- 20 Y b) SDC-8

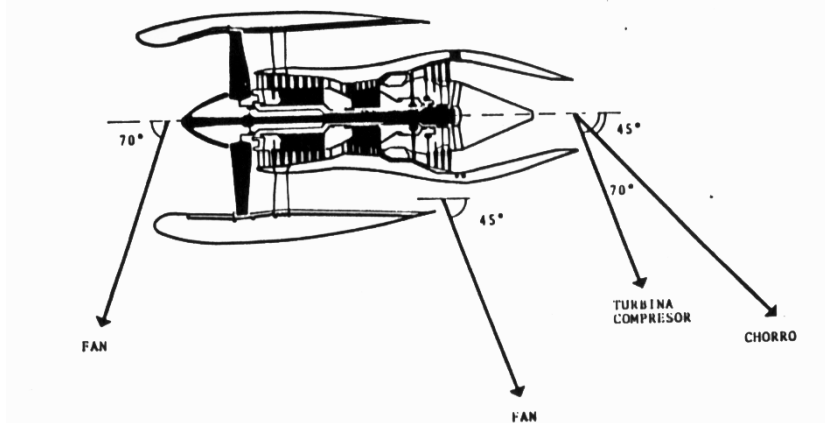


- Motores turbofán o de doble flujo y alto porcentaje de derivación

En estos motores se ha sustituido el compresor de baja presión por un ventilador de grandes dimensiones y un gran número de aspas, obteniendo una velocidad de salida de los gases mucho más reducida que en el caso anterior, produciendo consecuentemente una reducción el ruido del chorro (Figura 7.6).

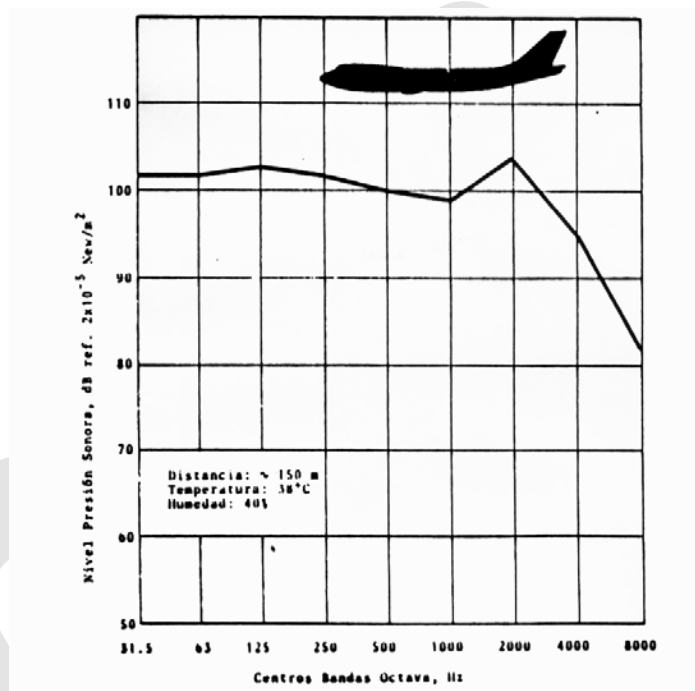
FIGURA 7.6

ESQUEMA Y DIRECCIONALIDAD DEL RUIDO GENERADO POR UN MOTOR TURBOFAN



Sin embargo el ventilador pasó a ser la fuente sonora dominante en las primeras aeronaves (Boeing 747), equipadas con este tipo de motores con un ruido de banda estrecha y alta frecuencia (Figura 7.7).

FIGURA 7.7 ESPECTRO EN BANDAS DE 1/1 OCTAVA DEL MÁXIMO DE PRESIÓN SONORA CORRESPONDIENTE AL DESPEGUE DE UN BOEING 747



Posteriormente el diseño acústico óptimo del ventilador y las modificaciones en los conductos de entrada y salida recubriéndolos con materiales acústicos muy absorbentes originó que las aeronaves equipadas con estos nuevos motores, tales como el Airbus, las últimas versiones del DC-10, fueran mucho menos ruidosas.

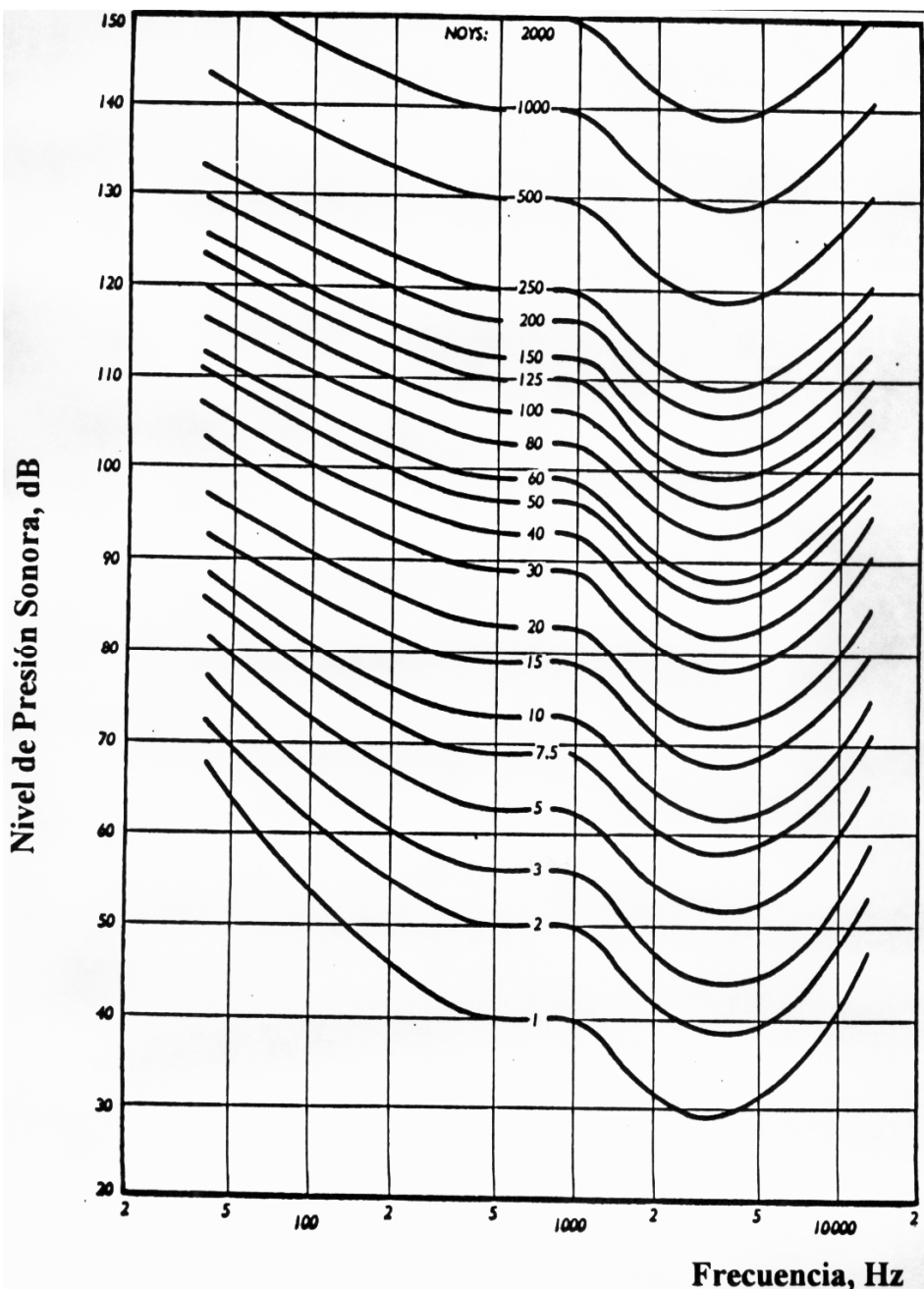
7.3 MAGNITUDES DE MEDIDA DEL RUIDO DE AERONAVES

De las distintas magnitudes definidas para medir el ruido y evaluar la respuesta del individuo y de la comunidad frente al ruido (fones, sones, dB(A), etc.), debido a su facilidad y simplicidad para medir y calcular posibilidades de considerar contribuciones de las distintas fuentes sonoras ambientales, el nivel sonoro en dB(A) se ha impuesto como magnitud para la medida del ruido de aeronaves; si bien hay que indicar que sea la magnitud más adecuada en el caso de ruido del tráfico aéreo.

En efecto, de hecho con la aparición de las aeronaves a reacción se definió una magnitud subjetiva conocida como Nivel de Ruido Percibido (PNL), expresado en dB(PN).

Esta magnitud, se calcula a partir de las curvas de Igual Ruidosidad (Figura 7.8); cuya unidad de medida es el Noy: a un ruido que se juzga con idéntica ruidosidad que un ruido cuya anchura es una octava de banda, centrada en 1000 Hz., con un nivel de presión sonora de 40 dB y una duración de 0.5 segundos, se le asigna el valor de 1 noy.

FIGURA 7.8 CURVAS DE IGUAL RUIDOSIDAD



El nivel de Ruidosidad Percibida del sobrevuelo de una aeronave se obtiene a partir de los valores de ruidosidad en noys en cada banda de frecuencia (n_i) mediante las fórmulas:

$$N = n_{\max} + 0.15 \left(\sum_i n_i - n_{\max} \right) \quad (7.1)$$

$$\text{PNL}(\text{dB}) = 40 + 33.3 \log N \quad (7.2)$$

El Nivel de Ruido Percibido, si bien se definió para aplicación general, se utilizó exclusivamente para la medida del ruido de aeronaves y se mantuvo durante varios años como la única unidad en este campo. Sin embargo la aparición de los motores turbofan con características tonales superpuestas al ruido de banda ancha y la incapacidad del Nivel de Ruido Percibido de reflejar de algún modo la duración del suceso, hicieron que se redefiniera, incorporando las correcciones adecuadas, creándose el Nivel Efectivo de Ruido Percibido, expresado en dB(EPN).

Para el cálculo del Nivel Efectivo de Ruido Percibido se requiere un análisis en 24 bandas de tercio de octava cada medio segundo, del ruido de sobrevuelo. Para cada uno de estos intervalos (i) se calcula el PNL al cual se le añaden las correcciones tonales, obteniendo el nivel de ruido percibido corregido por el tono:

$$(\text{PNL})_{\text{tono}} = (\text{PNL})_i + T_i \quad (7.3)$$

Posteriormente se añade la corrección por la duración D obtenida por integración de la curva (PNL) tono/tiempo, obteniéndose el Nivel Efectivo de Ruido percibido.

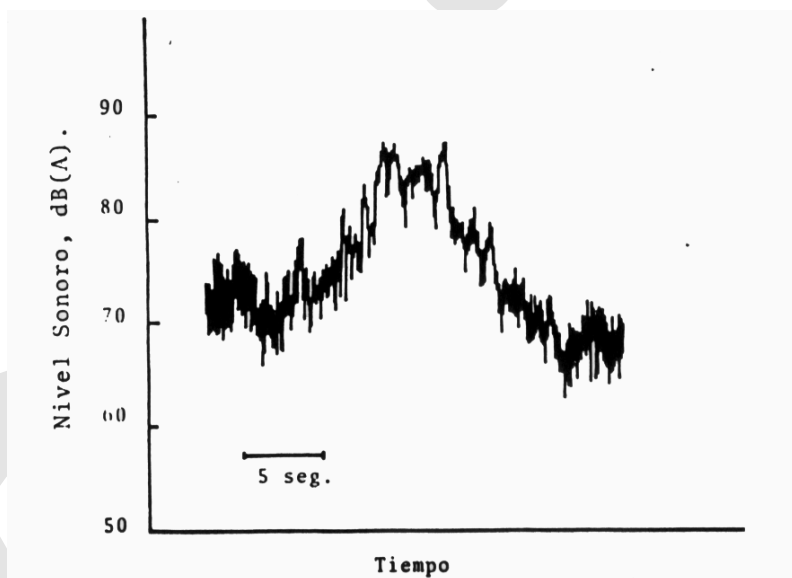
$$\text{EPNL} = ((\text{PNL})_{\text{tono}})_{\max} + D \quad (7.4)$$

El complejo procedimiento de cálculo de esta última magnitud y el elevado costo de la instrumentación necesaria para obtenerlo dificulta su utilización masiva en programas de medida del ruido ambiente, sin embargo es todavía la unidad utilizada en la certificación previa a los permisos de aeronavegación) y está presente en algunos índices de exposición al ruido de aeronaves en áreas cercanas a aeropuertos.

7.4 DESPEGUES Y ATERRIZAJES: HUELLAS SONORAS

Dado que la posición de una aeronave en movimiento varía en espacio y tiempo, igual variación ocurrirá con el ruido por ella generados tal y como se presenta en la Figura 7.9.

FIGURA 7.9 VARIACIÓN CON EL TIEMPO DEL RUIDO GENERADO POR EL SOBREVUELO DE UNA AERONAVE



De la misma manera se podrá determinar en un instante determinado la distribución del ruido en el terreno que esa aeronave sobrevuela.

En realidad se recurre a establecer la variación del ruido en espacio y tiempo en términos del nivel de ruido máximo registrado en cada punto, tomando el valor pico de la variación temporal (PNL máximo, dB(A) máximo, etc.) o quizás incluyendo parte de la duración de ese pico (EPNL máximo).

Procediendo así, y uniendo todos aquellos puntos que alcancen el mismo nivel máximo de ruido al paso de una aeronave se pueden obtener contornos iso-ruidosos o iso-sonoros conocidos también como Huellas Sonoras.

Estas huellas sonoras variarán naturalmente en forma y extensión con las distintas aeronaves, con la operación que estas realicen, con los distintos procedimientos de vuelo, con las rutas utilizadas, con la metodología local, etc. Por otra parte dichas huellas serán rectilíneas si la trayectoria de la nave

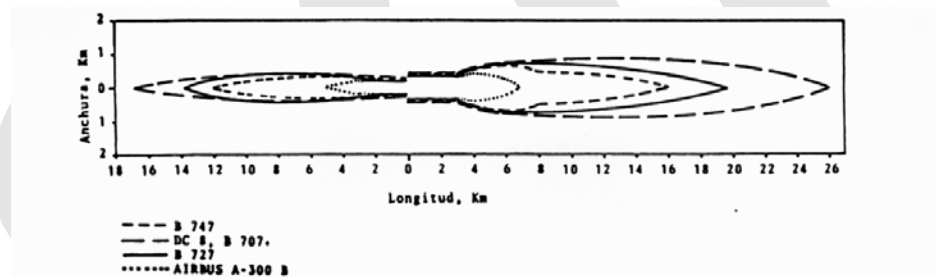
lo es, o bien se curvarán siguiendo en el terreno las evoluciones e la aeronave en el aire.

En la práctica se deformarán por la presencia de obstáculos en el camino de las ondas sonoras y no serán más que simples equivalencia de lo que ocurre en realidad, pero muy útiles a la hora de estimar el impacto de futuras operaciones o de comparar las características acústicas de distintas aeronaves.

Es costumbre expresar estas huellas o contornos en términos del Nivel de Ruido Percibido o Nivel Efectivo de Ruido Percibido y en intervalos separados de 5 ó 10 unidades.

La Figura 7.10 presenta el área típica encerrada por el contorno de 90 dB(PN) para cuatro aeronaves características de las distintas generaciones.

FIGURA 7.10 SUPERFICIE ENCERRADA POR EL CONJUNTO DE 90 dB (PN) PARA DISTINTAS AERONAVES



7.5 ÍNDICES DE EXPOSICIÓN AL RUIDO DE AERONAVES

En el caso de zonas cercanas a aeropuertos, sobrevolados con frecuencia por aeronaves, es lógico pensar que la comunidad responde no sólo al ruido producido por una operación (despegue o aterrizaje), sino que también al número de operaciones que tienen lugar en un determinado período de tiempo. En función de lo anterior se definió el concepto del Índice de Exposición al ruido de aeronave, tratando de representar la acción acumulada de un número de sucesos en un período de tiempo.

Nótese que se habla de índices de exposición y no de nivel de ruido, puesto que éste es sólo uno de los factores que se engloban en aquél.

Dicho Índice se define por la expresión:

$$L=A+N\log N+K \quad (7.5)$$

donde A identifica el ruido de un suceso o un suceso medio (dado que no todas las aeronaves generan el mismo ruido), N es el número de operaciones consideradas en un determinado período de tiempo y B y K son constantes a determinar de acuerdo con las respuestas de la comunidad sometida a niveles de ruido conocidos.

Estos índices para su utilización van acompañados por una serie de criterios que expresan las posibles reacciones comunitarias en función de los distintos valores de los mencionados índices.

La dependencia de la respuesta comunitaria, con el tipo de actividad perturbada ha obligado en algunos casos a considerar dos períodos y en otros casos tres, de forma que se penalizarán las operaciones realizadas en los períodos más críticos (tarde y noche) frente al período diurno.

Los distintos índices tradicionales de exposición a ruido de aeronaves son los siguientes:

- Curvas Compuestas de Ruido (CNR)

Este índice (Composite Noise Rating) se definió en los años cincuenta y fue el primer intento de cuantificar el nivel de ruido producido por las aeronaves.

Para un período de tiempo determinado se define el CNR como:

$$CNR=\overline{PNL}_{max}+10\log N-12 \quad (7.6)$$

donde:

\overline{PNL}_{max} es el nivel medio de los máximos PNL producidos por el sobrevuelo de las aeronaves

N es el número de operaciones

Posteriormente este índice sufrió diversas modificaciones adoptándose finalmente la expresión:

$$CNR=\overline{PNL}_{max}+10\log(N_d+10N_n)-12 \quad (7.7)$$

donde:

N_d = número de operaciones durante el día

N_n = número de operaciones durante la noche

En función de los valores CNR se han definido tres zonas correspondientes a la respuesta de la comunidad. Estas tres zonas son:

- CNR < 100. No se esperan quejas comunitarias, aunque el ruido puede interferir ocasionalmente con ciertas actividades.
- 100 < CNR < 115. Existe posibilidad de quejas individualizadas y de acciones comunitarias
- CNR > 115. Se producirán quejas individualizadas y acciones comunitarias importantes

▪ Predicción de Exposición al Ruido (NEF)

El índice NEF (Noise Exposure Forecast) clasificó a las distintas aeronaves en diversas categorías con similares características acústicas, definiéndose para cada una de ellas unas curvas EPNL en función de la distancia y para el aterrizaje y despegue.

El índice NEF para el tipo de aeronave *i* en la ruta *j* se define por:

$$NEF(ij) = EPNL(ij) + 10 \log(n_{\text{día}}(ij) + 16.67 n_{\text{noche}}(ij)) - 88 \quad (7.8)$$

donde:

NEF(ij) = Índice de Exposición al Ruido producido por la aeronave de la categoría (i) a lo largo de la ruta (j).

EPNL(ij) = Nivel de Ruido Efectivo producido en un punto por la aeronave de la categoría (i) en la ruta (j).

$n_{\text{día}}(ij)$, $n_{\text{noche}}(ij)$ = Número de operaciones realizadas durante el período diurno y nocturno respectivamente, por las aeronaves de la categoría (i), en la ruta (j).

88 = Constante de normalización.

El NEF total para un punto se obtiene sumando logarítmicamente los índices parciales NEF (ij), obtenidos de:

$$NEF = 10 \log \sum_i \sum_j \text{antilog} \frac{NEF(ij)}{10} \quad (7.9)$$

Con este nuevo índice, las reacciones de la comunidad expuestas al ruido de aeronaves son las que se indican en la Tabla 7.1.

TABLA 7.1 RELACIONES DE LA COMUNIDAD EN FUNCIÓN DEL VALOR DEL ÍNDICE NEF

NEF	CLASIFICACIÓN	REACCIÓN
45	Inaceptable	
40	Inaceptable	Se producirán quejas individualizadas y acciones comunitarias importantes
35	Casi aceptable	Existe posibilidad de quejas individualizadas y de acciones comunitarias
30		Algunas quejas, aunque el ruido puede interferir con alguna actividad
25	Aceptable	Algunas quejas esporádicas
20		No quejas

▪ Índice de Ruido y Número de operaciones (NNI)

Índice NNI (Noise and Number Index) fue desarrollado en Inglaterra en 1963.

Se define como:

$$NNI = \overline{PNL} + 15 \log N - 80 \quad (7.10)$$

donde:

PNL = valor medio de los niveles pico de los sobrevuelos durante el período diurno (06:00 – 18:00 horas).

N = es el número de movimientos durante el período diurno.

Este índice definía las zonas siguientes:

- NNI < 30. No existía problemas de molestia en la población expuesta a ruido de aeronaves
- 30 < NNI < 45. Posibles molestias en las comunidades expuestas al ruido de aeronaves
- 45 < NNI < 50. Molestias en las comunidades debiéndose dotar a las casas del aislamiento acústico necesario
- NNI > 50. Situación totalmente inaceptable

▪ Índice Isofónico (I)

Esta, unidad de medida (Índice Isopsophique) fue desarrollado en Francia, tras diversos estudios entorno a diferentes aeropuertos.

Se define según la expresión:

$$I=10\log_{10}\sum_{i=1}^n 10^{(N_i/10)} + \sum_{j=1}^P 10^{(N_{j+10})/10} -32 \quad (7.11)$$

donde:

N_i, N_j : = Son los niveles medios de los máximos PNL producidos por el sobrevuelo de las aeronaves durante los períodos de día y de noche respectivamente.

Este índice señala las distintas zonas:

- $I > 96$. Esta prohibido edificar y los edificios autorizados deben poseer un aislamiento acústico de 42 dB(A).
- $89 < I < 96$. La urbanización se limitará a lo ya edificado, exigiéndose un aislamiento acústico de los edificios de 35 dB(A).
- $84 < I < 89$. Se evitarán los bloques de viviendas
- $I < 84$. No existen restricciones en cuanto la edificación.

▪ Índice Q

Este índice (Stovindex Q) fue definido en la República Federal Alemana, utilizando el nivel equivalente en dB(A), mediante la expresión:

$$Q=13.3\log\sum_i g_i \frac{t_i}{T} 10^{\frac{L(A)_i}{13.3}} \quad (7.12)$$

donde:

i = Número total de operaciones

g_i = es un factor que depende del período considerado: día ($g=0$), noche ($g=5$)

t_i = la duración del sobrevuelo durante la cual el nivel sonoro está comprendido entre $L(A)_i$ y $L(A)_i - 10$ dB(A).

T = la duración del período diurno (06:00 – 22:00 h) o nocturno (22:00 – 06:00 h).

$L(A)_i$ = el nivel sonoro máximo en dB(A) producido por cada operación.

Este índice define las siguientes zonas:

- $Q > 75$. No se puede edificar
- $67 < Q < 75$. Se puede edificar cumpliendo normas específicas de aislamiento acústico
- $67 < 67$. No hay restricciones de construcción

▪ Dosis Total de Ruido (B)

Este Índice (Kosten Unit) fue desarrollado en Bélgica según la expresión:

$$B=20\log\sum_i n_i 10^{\frac{L(A)_i}{15}} -157 \quad (7.13)$$

donde:

\sum_i incluye la suma de las contribuciones de las distintas operaciones

n_i = un factor dependiente de la distribución de movimientos de aeronaves a lo largo de las 24 horas. Para el períodos 08:00 – 18:00, $n=1$ mientras que para el períodos 23:00 – 06:00, $n=10$.

$L(A)_i$ = el nivel máximo de sobrevuelo en dB(A)

Este límite establece que para valores inferiores a 40 – 45, el nivel de ruido es aceptable.

▪ Nivel Continuo Equivalente Pondera de Ruido Percibido

Con la proliferación de índices nacionales, surgió la iniciativa de definir un índice internacional que fuese aceptado por la mayor parte de los países; este índice propuesto por la OACI se denominó Nivel Continuo Equivalente Ponderado de Ruido Percibido (WECPNL).

Inicialmente se definió el Nivel Continuo Equivalente de Ruido Percibido, ECPNL (Equivalent Continuous Perceived Noise Level), dado por la expresión:

$$ECPNL=TNEL-10\log\frac{T}{t_0} \quad (7.14)$$

donde:

T = un período determinado.

TNEL = Nivel Total de Exposición al Ruido (Total Noise Exposure Level) definido por:

$$TNEL=10\log\sum_1^n \text{antilog}\frac{EPNL(n)}{10} +10\log\frac{T_0}{t_0} \quad (7.15)$$

donde:

TNEL = nivel total de exposición al ruido

EPNL = nivel efectivo de ruido percibido

N = número de operaciones consideradas

T0 y t0 = son 10 seg. y 1 seg. respectivamente

En el Anexo 16 de la OACI se sugiere que se corrijan los valores ECPNL según los períodos del día obteniéndose los índices WECPNL que según sean para dos o tres períodos se definen según:

$$\text{WECPNL}_2 = 10 \log \left(\frac{5}{8} \text{antilog} \frac{\text{ECPNL(D)}_2}{10} + \frac{3}{8} \text{antilog} \frac{\text{ECPNL(N)}_2 + 10}{10} \right) + s \quad (7.16)$$

$$\text{WECPNL}_3 = 10 \log \left(\frac{1}{2} \text{antilog} \frac{\text{ECPNL(D)}_3}{10} + \frac{1}{8} \text{antilog} \frac{\text{ECPNL(T)}_3 + 5}{10} + \frac{3}{8} \text{antilog} \frac{\text{ECPNL(N)}_3 + 10}{10} \right) + s \quad (7.17)$$

donde:

ECPNL(D)2-3, es el ECPNL durante el día 07:00 – 22:00 horas para dos períodos ó 07:00 – 19:00 horas para tres períodos

ECPNL(T)3, es el ECPNL durante la tarde 19:00 – 22:00 horas para tres períodos

ECPNL(N)2-3, es el ECPNL durante la noche 22:00 – 07:00 horas para dos o tres períodos

S, es un término corrector según la estación del año, con valores de +5.0 y –5.0 correspondientes a aquellos meses con temperaturas excediendo 25° C durante 100 horas o más, excediendo 20° C durante más de cien horas pero no alcanzando cien horas a 25° C o superior y excediendo 20° C durante menos de cien horas al mes, respectivamente.

La Figura 7.11, presenta un gráfico que permite establecer relaciones aproximadas entre los valores obtenidos utilizando los distintos índices, para un mismo volumen de tráfico.

Por otra parte y tal y como se indicó anteriormente, actualmente se está extendiendo el uso del Nivel Sonoro Continuo Equivalente (Leq) para la evaluación del ruido de aeronaves.

En efecto el Leq es la base de una serie de índices diferenciados entre sí por la duración del período considerado o por las penalizaciones que incorporen según en el período en que se produzca el ruido.

- Nivel Sonoro Continuo Equivalente Diario (L^{24eq}) (DNEL)
Definido para 24 horas y calculado como media de los niveles horarios.
- Nivel Sonoro Medio Día y Noche (L_{dn})
Desarrollado y recomendado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE.UU. y aceptado por las demás agencias (HUD, FAA) para describir la exposición al ruido de aeronaves alrededor de un aeropuerto.

- Nivel Equivalente de Ruido Comunitario (CNEL)
Desarrollado y utilizado en el Estado de California; se define por la expresión:

$$CNEL=10\lg_{10}\left(\frac{1}{24}\right)\left(10^{HNLD/10}+310^{HBLE/10}+1010^{HNLN/10}\right) \quad (7.19)$$

donde HNLD, HNLE y HNLN son los niveles equivalentes horarios para cada período día (07:00 – 19:00 h), tarde (19:00 – 22:00 h) y noche (22:00 – 07:00 h). El nivel equivalente horario se calcula según:

$$HNL=10\log\left(10^{L/10}dt/3600\right) \quad (7.20)$$

donde L es el nivel sonoro instantáneo.

Este índice determina las siguientes zonas:

- $CNEL \leq 55$ No quejas, nivel exterior compatible con la protección el bienestar y de la salud pública.
 - $55 < CNEL < 60$ Pocas quejas comunitarias
 - $60 < CNEL < 70$ El ruido de aeronaves se identifica como fuente de molestias y surgen quejas.
 - $70 < CNEL < 75$ Existen quejas y empiezan las acciones comunitarias.
 - $CNEL > 75$ La acción comunitaria es intensa.
- Nivel de Polución Sonora (NPL, LNP)
Definido en función del Leq por la expresión:

$$L_{NP}=Leq+KS \quad (7.21)$$

siendo:

S = la desviación standard

K = constante cuyo valor es normalmente 2.5

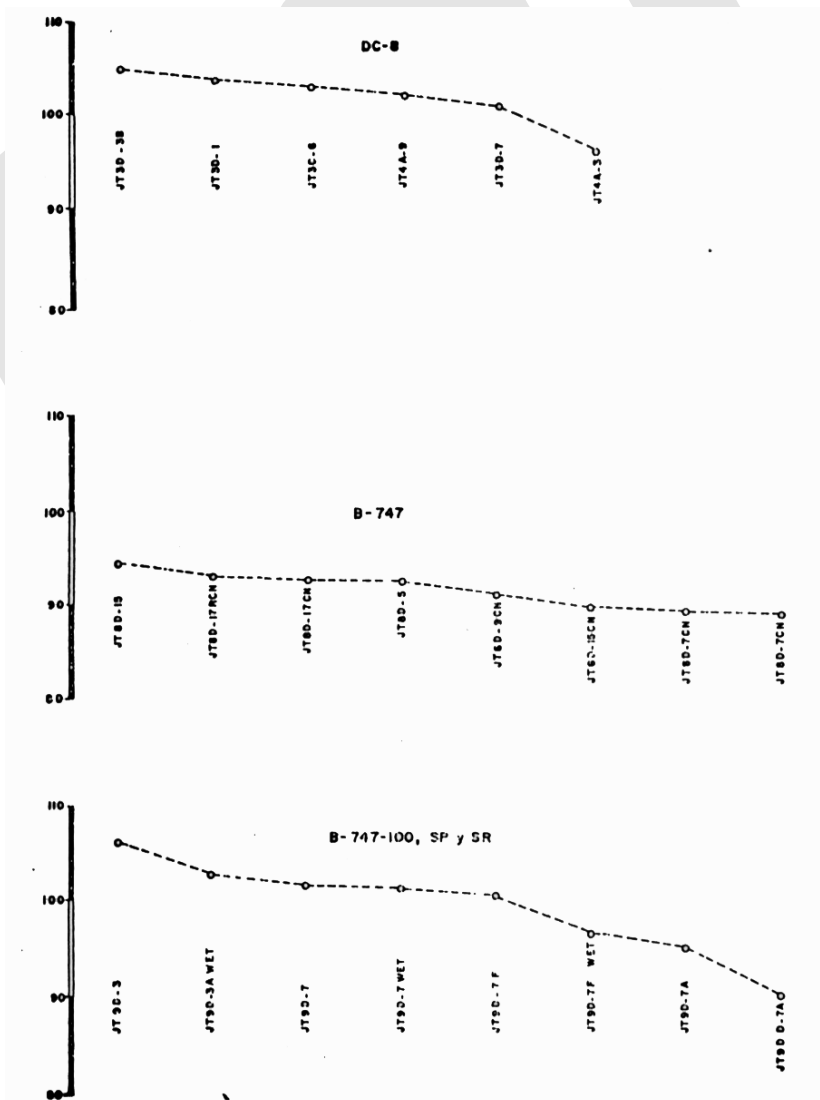
Aunque este índice es subjetivamente más completo y lógico que el Leq , la dificultad de medir y predecir la desviación standard lo ha relegado a un índice de laboratorio.

7.6 NIVELES DE RUIDO GENERADOS POR LAS AERONAVES

Las fuentes de ruido dominantes en una aeronave son sin duda los motores, en cualquier régimen operativo; por tanto dependiendo del tipo de motores instalados, un mismo tipo de aeronaves produce un nivel mayor o menor de ruido; igualmente la utilización de distintos tratamientos absorbentes en el interior de estos motores varía el nivel de ruido emitido por la misma aeronave.

La Figura 7.12 presenta la variación del nivel sonoro máximo producido por un mismo punto situado bajo la ruta de despegue de tres tipos distintos de aeronaves equipadas cada una con diferentes modelos de motores, se aprecia el lento pero efectivo esfuerzo de la industria aeronáutica en la reducción del nivel sonoro en un mismo tipo de aeronave.

FIGURA 7.12 REDUCCIÓN DEL RUIDO DE UNA AERONAVE EN FUNCIÓN DEL TIPO DE MOTORES INSTALADOS



La distinta potencia requerida para cada modo de operación hace variar notablemente los niveles sonoros requeridos.

La Figura 7.13 presenta esa variación para algunos tipos de aeronaves en un mismo punto y para las tres posiciones de empuje de motores típicos: potencia máxima, potencia de ascenso y potencia de aproximación. Por todos estos motivos los niveles de emisión de los distintos tipos de modelos de aeronaves varían ampliamente; como datos orientativos se presentan en las Figuras 7.14 y 7.15 los niveles efectivos de ruido percibido y los niveles sonoros máximos para distintas categorías de aeronaves comerciales a reacción en función de la distancia a las mismas y de la operación que realizan.

FIGURA 7.13
VARIACIÓN DEL NIVEL SONORO MÁXIMO EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA POR MOTOR

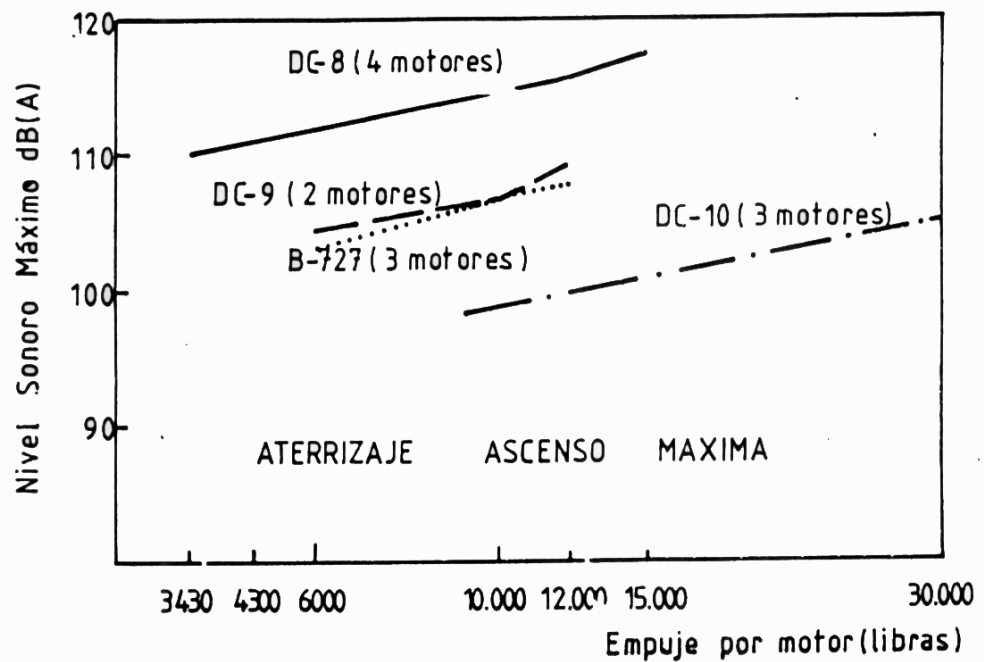


FIGURA 7.14
NIVELES DE RUIDO DE AERONAVES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA. EPNL

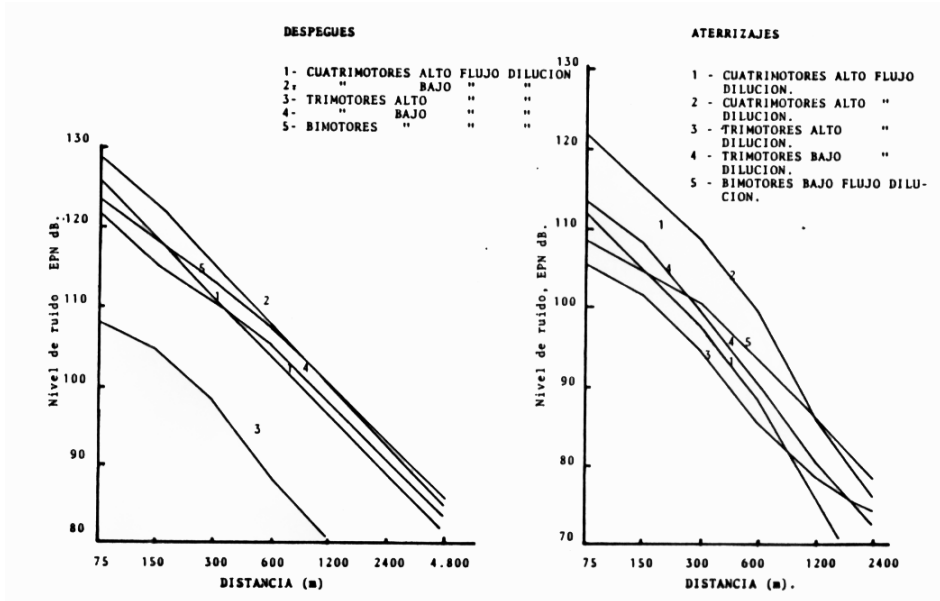
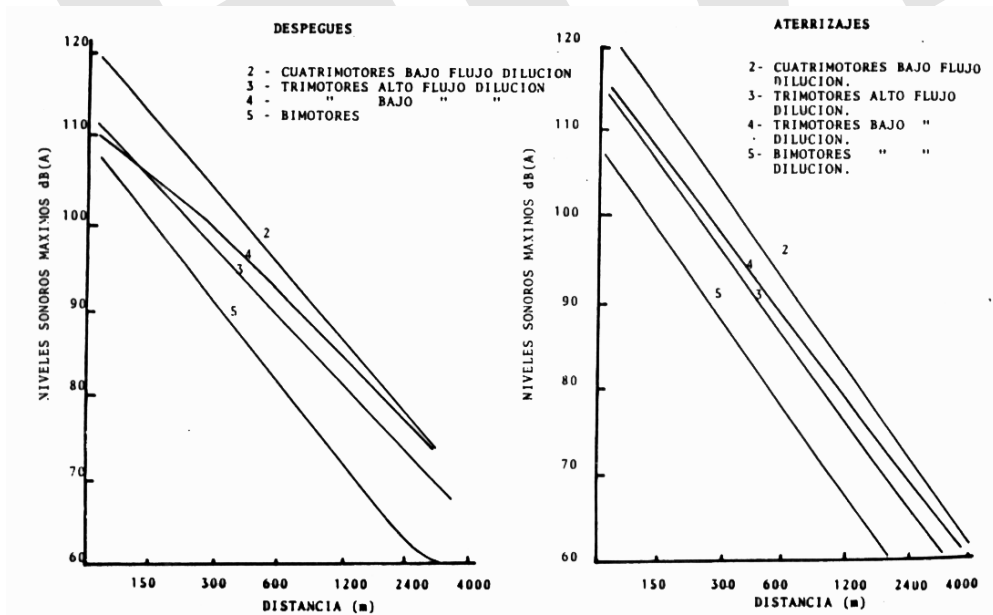


FIGURA 7.15
NIVELES DE RUIDO DE AERONAVES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA. dB(A)



7.7 PREDICCIÓN DEL RUIDO GENERADO POR EL SOBREVUELO DE LAS AERONAVES

Las diferentes metodologías existentes para predecir los niveles de exposición al ruido de aeronaves en los entornos aeroportuarios varían en detalles de forma, lo que permiten una mayor o menor flexibilidad y complejidad dependiendo del grado de detalle al que se quiere llegar y su objetivo es ofrecer una visión típica de los niveles sonoros que en promedio existirán en la zona de estudio.

En términos generales todas las metodologías del cálculo de los índices de exposición requieren la obtención del ruido que cada operación produce en los distintos puntos del área de estudio, hallar una media de estos niveles, sumarle el logaritmo del número de operaciones que afectan a cada punto y finalmente sumar o restar una constante.

Para realizar las predicciones y determinar inicialmente el tráfico diario medio para el período de tiempo considerado (por ejemplo un año, durante el verano, etc.). Ese tráfico deberá ser descompuesto según tres criterios distintos: según el período en que se realice el vuelo (día, tarde y noche), según el tipo de aeronave que realice el vuelo y según el destino, puesto que en la mayor parte de casos este condiciona la ruta de aproximación y alejamiento que ha de seguir.

La distribución temporal del tráfico se justifica por el hecho de que muchos de los índices de exposición propuestos, penalizan aquellas operaciones que se producen durante los períodos de la tarde (18:00 – 22:00 horas) o de la noche (22:00 – 06:00 horas).

El tráfico ha de ser distribuido por tipos de aeronaves ya que estas no solo varían en el número de motores, sino en su potencia, trayectoria o perfil de ascenso, características técnicas y operacionales. Aunque teóricamente cada modelo de aeronave debería formar un tipo distintos, usualmente se suelen agrupar en una categoría aquellas que tienen el mismo número de motores y con similar tecnología en su diseño y construcción. En general las aeronaves actuales están equipadas con motores:

- Turbofan de bajo porcentaje de derivación de flujo (BPD)
- Turbofan de alto porcentaje de derivación de flujo (APD)
- Turbohélices
- Hélices

De acuerdo con esta clasificación y con el número de motores que las equipan, se pueden establecer hasta doce categorías o tipos distintos aunque en muchos aeropuertos se reduzcan en la práctica a solo 3 ó 4. Estas categorías están detalladas en la Tabla 392. Se establece que todas las aeronaves de una misma categoría generan niveles de ruido similares siempre que utilicen los mismos procedimientos de aproximación y despegue.

TABLA 7.2
CLASIFICACIÓN POR CATEGORÍAS ACÚSTICAS DE LAS DISTINTAS AERONAVES

CATEGORÍA ACÚSTICA	TIPO DE AERONAVE
I	Boeing 747
II	DC-10, L-1011 Tristar
III	Airbús A300B
IV	Boeing 707, DC-8, VC-10, Ilushyn 62, Coronado
V	Trident 3B
VI	Boeing 727, Tupolev 154, Trident 3
VII	Boeing 737, BAC 1-11, DC-9, Tupolev 134, Caravelle, Comet
VIII	Supersónicos
IX	Turbohélices
X	Reactores privados
XI	Avionetas monomotores
XII	Avionetas bimotores

Los datos publicados por los fabricantes permiten elaborar una serie de curvas que dan los niveles de ruido a distintas distancias para cada tipo de aeronave. Este tipo de curvas se especifican para las distintas potencias utilizadas en cada operación (máxima, de ascenso, aproximación).

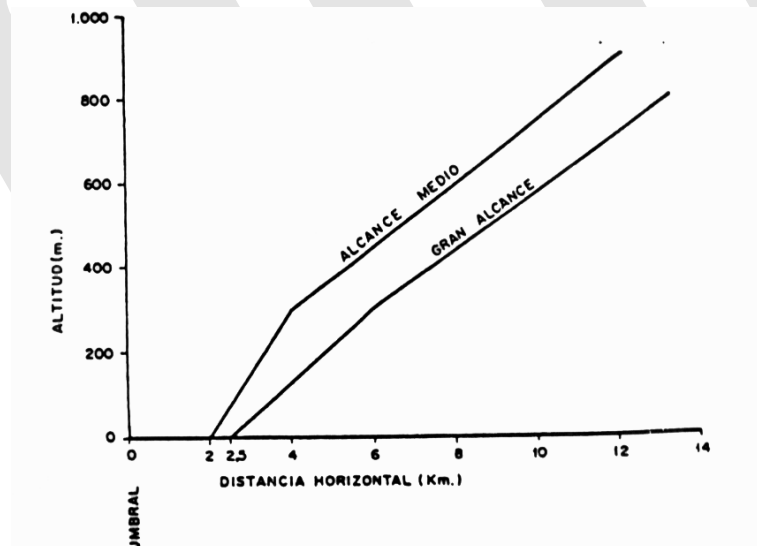
Las operaciones de acceso o alejamiento de las aeronaves de un aeropuerto discurren a lo largo de unas trayectorias espaciales cuya proyección en el plano forman las distintas rutas aéreas; su trazado depende de los posibles orígenes y destinos del tráfico, e la situación de ayudas a la navegación y de la definición de las áreas de espera así como de la situación de zonas urbanas sobre las que se evita sobrevolar.

Los perfiles de ascenso de una aeronave vienen limitados por las características de la aeronave, por el peso actual en cada operación, por las exigencias aeroportuarias y finalmente por las condiciones meteorológicas. Normalmente una operación de despegue viene caracterizada por la utilización de una potencia máxima en la primera parte de la operación (carrera de despegue y ascenso inicial) que suele durar 1 ó 2 minutos, con una pendiente muy pronunciada, para pasar posteriormente a una potencia de ascenso (altura alcanzada/distancia horizontal recorrida) pueda aproximarse mediante dos segmentos rectilíneos caracterizados cada uno por la generación de distintos niveles de ruido. En aquellos casos en los que se especifique un procedimiento de reducción de potencia en el ascenso pueden darse hasta tres segmentos.

Los fabricantes de cada modelo de aeronave dan dentro de las características operacionales, esos perfiles para unas determinadas condiciones meteorológicas normales, unos determinados pesos y a nivel del mar. Igualmente ofrecen las oportunas correcciones para las distintas condiciones reales de los aeropuertos.

La Figura 7.16 presenta un ejemplo de estos perfiles para varias categorías o tipos de aeronaves en condiciones normales.

FIGURA 7.16 PERFILES DE ASCENSO



Los perfiles de descenso son sin embargo mucho más sencillas; en este caso la aproximación con 3° de inclinación hasta el punto de contacto con la pista define claramente una trayectoria que permite conocer en cada momento la

altura de la aeronave desde el momento en que esta alineada con la pista, siendo común a todos los tipos de aeronave.

FIGURA 7.17 CURVAS DE IGUAL ÍNDICE DE EXPOSICIÓN



Según los perfiles de ascenso y aterrizaje de cada aeronave y las rutas de despegue y aproximación se pueden obtener las alturas de las aeronaves en cualquier instante y con ayuda de la red cartográfica y topográfica, las distancias mínimas de las aeronaves a cualquier punto del terreno.

A partir de esas distancias y con ayuda de los datos acústicos Potencia aplicada / Nivel de ruido / Distancia, se obtienen al aplicar las atenuaciones adecuadas los niveles de ruido generados por cada operación en cada punto correspondientes a los vértices de una retícula centrada en el aeropuerto.

Conocidos estos niveles para todas las operaciones que afectan en cada período se obtiene la media logarítmica de todos ellos y se aplica la correspondiente expresión del índice utilizado, obteniéndose el valor del índice en cada punto elegido del terreno. La unión de todos los puntos de igual índice da los contornos de igual exposición al ruido (Figura 7.17 anterior).

ESAI