GESTIÓN DE LA CALIDAD AMBIENTAL

MÓDULO: CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

CONTENIDOS

1 REVISIÓN DE CONCEPTOS GENERALES 2

1.1 FRECUENCIA 3
1.2 LONGITUD DE ONDA 3
1.3 COMPOSICIÓN ESPECTRAL 3
1.4 IMPEDANCIA ACÚSTICA DEL MEDIO 6
1.5 VELOCIDAD DEL SONIDO 7
1.6 PRESIÓN SONORA 8
1.7 POTENCIA ACÚSTICA 8
1.8 ENERGÍA ACÚSTICA 8
1.9 INTENSIDAD ACÚSTICA 8
1.10 NIVEL DE PRESIÓN SONORA 9
1.11 NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA Y NIVEL DE INTENSIDAD ACÚSTICA 10

2 PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN CAMPO LIBRE 10

2.1 DIVERGENCIA ESFÉRICA 11
2.2 DIVERGENCIA CILÍNDRICA 12

3 OPERACIONES CON NIVELES SONOROS 13

3.1 SUMA DE NIVELES DE PRESIÓN SONORA 13
3.2 DIFERENCIA DE DOS NIVELES DE PRESIÓN SONORA 15

4 PARÁMETROS REPRESENTATIVOS EN UN INTERVALO DE TIEMPO 16

4.1 NIVEL SONORO CONTINUO EQUIVALENTE (NIVEL CONTINUO EQUIVALENTE, NIVEL SONORO EQUIVALENTE, NIVEL EQUIVALENTE, L_{EQ}) 16
4.2 NIVELES DE PERMANENCIA 17
4.3 CURVAS DE PERMANENCIA 18

5 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN 18

5.1 SONÓMETRO 19
5.1.1 CLASES DE SONÓMETROS 19
5.1.2 ACERCA DEL MICRÓFONO 19
5.1.3 CURVAS DE PONDERACIÓN O COMPENSACIÓN FRECUENCIAL 20
5.1.4 RESPUESTA TEMPORAL 22

5.2 ANALIZADOR DE ESPECTRO 23
5.3 DOSÍMETRO 23
5.4 CALIBRADORES 24

6 NORMATIVA SOBRE CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN NUESTRO PAÍS 24

6.1 JURISDICCIÓN DEPARTAMENTAL 25
6.2 JURISDICCIÓN NACIONAL 24

7 CORRECCIONES PARA EVALUAR MOLESTIA POR RUIDO 25

7.1 CORRECCIÓN POR COMPONENTES IMPULSIVOS 26
7.2 CORRECCIÓN POR BAJAS FRECUENCIAS 26
7.3 CORRECCIÓN POR TONOS PUROS 26

8 MODELOS PREDICTIVOS DE NIVELES DE PRESIÓN SONORA 27

8.1 MODELOS PREDICTIVOS DE RUIDO URBANO 28
8.2 MODELOS PREDICTIVOS DE RUIDO DE TRÁNSITO EN CARRETERAS 31
8.3 PREDICCIÓN DE NIVELES SONOROS ASOCIADOS CON FUENTES FIJAS: NORMA ISO 9613:2 32

9 ALGUNAS MEDIDAS APLICABLES AL CONTROL DE RUIDO AMBIENTAL 35

9.1 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO 35
9.2 BARRERAS ACÚSTICAS 35

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA 36

1 Revisión de conceptos generales

El sonido es una perturbación de la presión de equilibrio de un medio material elástico, que se propaga como una ***onda de presión*** y que potencialmente puede, de acuerdo con su frecuencia y amplitud, generar ***sensación auditiva en las personas***. En estas notas sólo se considerará el caso en que la propagación del sonido ocurra por vía aérea.

Si en un punto cualquiera se produce una perturbación del aire que implique allí un aumento momentáneo de la presión, la diferencia entre las presiones en el punto perturbado y en el aire que lo circunda hace que el aire a mayor presión tienda a descomprimirse, modificando a su vez la presión en el aire a su alrededor. Así siguiendo, la perturbación inicial se va desplazando o propagando en el medio. Una ***fuente*** o ***emisor sonoro*** resulta ser cualquier agente capaz de producir la perturbación mecánica inicial que se acaba de describir. La mayor parte de los

sonidos reales son el resultado de una serie de perturbaciones sucesivas y no de una sola. Las nuevas perturbaciones no modifican la propagación de las anteriores.

Los atributos principales de las ondas sonoras son su frecuencia y su amplitud. Esta última está relacionada con la presión sonora y, en consecuencia, con la energía que transporta la onda. Otra variable de gran interés es el tiempo, en lo que se refiere a la evolución, permanencia y variabilidad de los sonidos.

1.1 Frecuencia

La frecuencia puede asociarse con la sensación de altura (el tono) del sonido: los sonidos graves son de baja frecuencia, en tanto los agudos corresponden a altas frecuencias. Vale aclarar que *puede asociarse con* la sensación de altura pero *no es exactamente lo mismo*, es decir, para trabajar con alturas el complejo funcionamiento del oído hace necesario recurrir a parámetros de la psicoacústica.

El comportamiento del oído humano varía según la frecuencia del sonido incidente. El intervalo de frecuencias audibles –o sea el rango de frecuencias en que una onda de presión es susceptible de generar sensación auditiva al incidir sobre la membrana del tímpano de una persona– va de 20 Hz a 20.000 Hz. Sin embargo, aún en ese intervalo de frecuencias no todas las ondas generan sensación auditiva, dependiendo de su amplitud.

1.2 Longitud de onda

En los sonidos periódicos de frecuencia *f*, la correspondiente perturbación se repite cada un tiempo *T = 1 / f*. Durante ese tiempo, la perturbación se desplaza una distancia *c x T*, donde *c* es la velocidad de propagación de las ondas de presión en el medio y *T* es el período de la onda. En el caso en que el medio material es el aire, la velocidad del sonido a 20 ºC es de 343 m/s (ver Tabla 1.3).

Esta distancia, que es la que se tiene entre dos perturbaciones sucesivas, se denomina ***longitud de onda*** λ. Se puede expresar como:

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

1.3 Composición espectral

Los sonidos reales pueden entenderse o analizarse como una superposición de numerosos sonidos (o sea, de numerosas ondas) de diferentes frecuencias.

La perturbación periódica más simple es la onda senoidal, que es aquélla en la que la presión varía en el tiempo según el seno de un cierto ángulo que depende de la frecuencia *f* de la onda:

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

En este caso el sonido resultante se denomina ***tono puro***, debido a que auditivamente produce la sensación de “altura”, “tono” o “entonación” en el oído humano. La sensación de altura del

tono aumenta con la frecuencia. Así, los sonidos de baja frecuencia son graves (bajos), mientras que los de alta frecuencia son agudos (altos).

Los tonos puros se encuentran rara vez en la naturaleza, pero son sumamente importantes como herramienta de análisis, ya que todo sonido puede considerarse como formado por la superposición de tonos puros de diversas frecuencias. Este importante resultado se conoce como ***Teorema de Fourier***.

En efecto, un sonido periódico de frecuencia *f* puede descomponerse en un conjunto de tonos puros cuyas frecuencias son múltiplos de *f*. Estos sonidos se denominan *sonidos armónicos*, *sobretonos armónicos*, o simplemente *armónicos*. La frecuencia *f* se denomina ***frecuencia fundamental***. La intensidad de los distintos armónicos varía de acuerdo con las características del emisor, lo que confiere al sonido su ***timbre***, propiedad que permite identificar al emisor cuando un mismo sonido proviene, por ejemplo, de diferentes instrumentos musicales o es entonado por voces diferentes.

La forma más ventajosa de "descomponer" un sonido real en otros más simples es hacerlo en los componentes que resultan de emplear para ello un conjunto de intervalos conocidos de frecuencias que se designan como *bandas*. Este tratamiento, que se llama ***análisis espectral***, se realiza en general en *bandas de octava* o *de tercios de octava*.

Se denomina ***banda de octava*** al intervalo de frecuencias que queda definido por una relación tal que la frecuencia extrema superior es el doble de la inferior *($f_2 = 2\, f_1$)*. Vale la pena indicar que en la octava musical (que es el intervalo que se forma entre notas sucesivas que se llaman igual, por ejemplo de un *do* al siguiente *do*) se cumple esta misma relación de frecuencias.

Se denomina ***banda de tercio de octava*** a aquélla en que sus frecuencias extremas están relacionadas de la siguiente forma: $f_2 = 2^{1/3} f_1$.

Resulta entonces que cada banda de octava (BO) o de tercio de octava (BTO) tiene una amplitud mayor que la anterior, es decir, se trata de bandas de ancho variable. En acústica no es usual emplear bandas de ancho constante.

Las frecuencias centrales de las bandas de octava y de tercio de octava se pueden obtener conociendo las frecuencias extremas de la misma y viceversa, incorporando a lo ya planteado sólo una premisa más: la frecuencia central de una banda (BO o BTO) es la media geométrica de sus frecuencias extremas.

Luego, en una BO se tiene:

$$f_2 = 2\, f_1$$

$$f_c = (f_1\, f_2)^{1/2} = (2\, f_1 2)^{1/2} = f_1 \sqrt{2}$$

Las frecuencias centrales que habitualmente se emplean y en las que trabajan los analizadores de espectro están estandarizadas según normas internacionales.

En la Tabla 1-1 se listan las frecuencias centrales de las bandas normalizadas que cubren el rango audible tanto para octavas (valores en líneas grises) como para tercios de octava (valores en líneas blancas).

Tabla 1-1: **Frecuencias centrales normalizadas para bandas de octava y tercios de octava (en Hz)**

Octavas	Tercios de Octava
	12,5
16	16
	20
	25
31,5	31,5
	40
	50
63	63
	80
	100
125	125
	160
	200
250	250
	315
	400
500	500
	630
	800
1000	1000
	1250
	1600
2000	2000
	2500
	3150
4000	4000
	5000
	6300
8000	8000
	10000
	12500
16000	16000
	20000

Las frecuencias extremas de cada banda están normalizadas también.

En la Tabla 1-2 se presentan entonces sus valores para las BO y BTO en el rango audible. El criterio de las filas sombreadas es el mismo que en la tabla anterior.

Tabla 1-2. Frecuencias extremas de las bandas de octava y tercios de octava, en Hz (a partir de Giménez de Paz, 2007)

Bandas de Octava normalizadas		
f_{inf}	$f_{central}$	f_{sup}
11,2	16	22,4
22,4	31,5	45
45	63	90
90	125	180
180	250	355
355	500	710
710	1000	1400
1400	2000	2800
2800	4000	5600
5600	8000	11200
11200	16000	22400

Bandas de Tercio de Octava normalizadas		
f_{inf}	$f_{central}$	f_{sup}
11,2	12,5	14
14	16	18
18	20	22,4
22,4	25	28
28	31,5	35,5
35,5	40	45
45	50	56
56	63	71
71	80	90
90	100	112
112	125	140
140	160	180
180	200	224
224	250	280
280	315	355
355	400	450
450	500	560
560	630	710
710	800	900
900	1000	1120
1120	1250	1400
1400	1600	1800
1800	2000	2240
2240	2500	2800
2800	3150	3550
3550	4000	4500
4500	5000	5600
5600	6300	7100
7100	8000	9000
9000	10000	11200
11200	12500	14000
14000	16000	18000
18000	20000	22400

1.4 Impedancia acústica del medio

Cuando la perturbación (la onda sonora) pasa por un punto, las partículas correspondientes experimentan un pequeño desplazamiento respecto a su posición de equilibrio. Al terminar el pasaje de la perturbación, cada partícula vuelve a su estado original. La distancia máxima que se desplazan las partículas desde su posición de equilibrio se denomina *amplitud* del desplazamiento.

Aunque se podría describir el fenómeno en términos de la variación de la distancia a la posición en cada instante *(elongación)*, resulta más conveniente hacerlo en términos de la velocidad *u*. Una de las razones es que en una onda plana la presión es proporcional a la velocidad de las partículas. Cada partícula se mueve muy poco en la misma dirección a la que avanza la onda, y es la onda la que se propaga a mayores distancias y también a mayor velocidad. Se puede escribir:

$$p = u \cdot \rho_o \cdot c, \quad \text{o bien} \quad \frac{p}{u} = \rho_o \cdot c$$

siendo:

ρ_o = densidad del aire en kg/m^3 (a 20 ºC es de 1,21 kg/m^3)

c = velocidad de propagación del sonido en m/s (en aire a 20 ºC, es de 343 m/s)

u = velocidad de las partículas del medio, en m/s

Si se define entonces la ***impedancia acústica específica*** del medio, ***Z***, como la relación ***p/u***, y resulta **p = Z.u**, siendo $Z = \rho_o c$.

La impedancia acústica del aire a 20 ºC es de 1,21 kg/m^3 x 343 m/s = 415 kg/m^{2}s = 415 Rayl

1.5 Velocidad del sonido

En una onda plana, como es el caso del sonido, la presión en cada instante es constante sobre cada plano perpendicular a la dirección de propagación. La onda se desplaza con cierta velocidad ***c***, de tal modo que al cabo de un tiempo ***t*** las variaciones de presión llegan a una distancia ***d = c · t*** del punto en que se inició el fenómeno. La velocidad de propagación c de la onda es mucho mayor que la velocidad con que se mueven las partículas del medio con respecto a su posición de equilibrio.

Tabla 1-3: Velocidad del sonido para ondas planas, densidad e impedancia acústica característica de varios medios (Beranek, 1993)

	Velocidad del sonido (m/s)	Densidad (kg/m^3)	Impedancia acústica característica (Rayls)
Aire 0 ºC	337	1,29	4,35E+02
Aire 20 ºC	343	1,21	4,15E+02
Vapor 100 ºC	405	0,6	2,43E+02
Agua salada 13 ºC	1500	1026	1,54E+06
Agua pura 20 ºC	1481	998	1,48E+06
Alcohol 20 ºC	1150	790	9,09E+05
Glicerina 20 ºC	1980	1260	2,49E+06
Ladrillo macizo	3700	2000	7,40E+06
Hormigón	3100	2300	7,13E+06
Acero	5000	7800	3,90E+07
Aluminio	5200	2700	1,40E+07
Plomo	1200	11300	1,36E+07
Vidrio	6000	2500	1,50E+07
Caucho duro	1470	1100	1,62E+06
Caucho blando	70	950	6,65E+04
Cartón yeso	680	650	4,42E+05

En un medio gaseoso, c depende del peso molecular del gas y de su temperatura; para un mismo gas crece a mayor temperatura y, a igual temperatura, decrece para gases más pesados. Para temperaturas cercanas a la temperatura ambiente (t = 20 ºC), la velocidad de propagación el sonido en el aire es de *c* = 343 m/s. En aire es válida la siguiente aproximación:

$$v_s \approx 331{,}4 + 0{,}606 \cdot t$$

Donde 331,4 m/s es la velocidad del sonido en el aire a 0 ºC y t se expresa en ºC.

En la Tabla 1-3 se presentan valores de velocidad del sonido, densidad volumétrica e impedancia acústica característica para varios medios.

1.6 Presión sonora

El sonido se asocia con una perturbación o excitación consistente en una variación de la presión ***P*** del aire respecto a la presión de equilibrio. El oído es estimulado por esas variaciones de la presión de equilibrio de la atmósfera; en determinadas condiciones de frecuencia e intensidad, éstas son susceptibles de ser percibidas por las personas, generando una sensación auditiva. En lo sucesivo se llamará ***presión sonora, presión acústica*** o simplemente ***presión p*** a la presión *incremental* que resulta de restar la presión estática o de equilibrio a la presión total en el punto considerado: $p = P - p_{atm}$

La presión incremental es mucho menor en magnitud que la presión atmosférica. En efecto, mientras que la presión atmosférica es del orden de:

$$p_{atm} = 10^5 \text{ Pa}$$

La presión incremental correspondiente a sonidos audibles -sin llegar a provocar dolor- varía entre 20×10^{-6} Pa y 200 Pa. Aunque el umbral de la percepción es un valor consensuado, hay algunas discrepancias entre autores acerca de la presión correspondiente al umbral del dolor, dado que pocas décadas atrás se seguía manejando el valor de 20 Pa para ese umbral.

1.7 Potencia acústica

La ***potencia acústica*** es la cantidad de energía acústica que puede emitir una fuente por unidad de tiempo. Es una *característica de la fuente*.

$$W = \frac{E}{\Delta t}$$

1.8 Energía acústica

La ***energía acústica*** se relaciona con la energía de las partículas del medio en el que se propaga una onda sonora, y se puede asociar con la energía cinética de las mismas. En consecuencia, la relación entre la velocidad de las partículas y la presión sonora será cuadrática. Como la energía cinética es proporcional a u^2, también será proporcional a p^2.

1.9 Intensidad acústica

La ***intensidad acústica I*** es el *flujo de energía acústica* que atraviesa una superficie por unidad de tiempo. La unidad de medida de la intensidad es el W/m^2.

$$I = \frac{E}{S\,\Delta t} = \frac{W}{S}$$

La intensidad del sonido se vincula con la amplitud de la onda de presión de la siguiente forma:

$$I = \frac{p^2}{Z} = \frac{p^2}{\rho_0 c}$$

La intensidad sonora varía en el tiempo. El valor medio en un intervalo de tiempo *T*, se denomina intensidad media.

Por otra parte, como la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión sonora, la energía y la potencia acústica también lo son:

$$E = I \cdot S\,\Delta t = \frac{p^2}{Z} S\,\Delta t = \frac{p^2}{\rho_0 c}\,S\,\Delta t$$

$$W = \frac{E}{\Delta t} = \frac{p^2}{Z} S = \frac{p^2}{\rho_0 c}\,S$$

Considerando las presiones correspondientes a los umbrales de la audición y del dolor, las intensidades entre las que el oído humano percibe sensación auditiva son de 10^{-12} W/m^2 a 10^2 W/m^2.

1.10 Nivel de presión sonora

Debido a que el oído humano es capaz de captar un intervalo muy amplio de presiones sonoras (entre 20 x 10^{-6} Pa y 200 Pa), la intensidad acústica no resulta ser un parámetro demasiado cómodo para trabajar. Para manejar magnitudes con tan amplio rango de variación se recurre al concepto de *nivel*. Así, se trabaja con *niveles de presión sonora*, *niveles de intensidad sonora* y *niveles de potencia acústica*. En los tres casos, sus valores se expresan en dB.

En el caso de los niveles de presión sonora, el valor de referencia que se emplea es el umbral auditivo o umbral de la percepción, p_0 = 20 x 10^{-6} Pa (es la mínima presión que estadísticamente es necesaria para generar sensación auditiva a 1000 Hz en oídos sanos de 18 años de edad). Se define entonces el ***nivel de presión sonora*** como:

$$L_p = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right)^2$$

Siendo:

L_p= nivel de presión sonora, expresado en dB

P= presión sonora, expresada en Pa

p_o = presión correspondiente al umbral de la audición, expresada en Pa

El nivel de presión sonora en el umbral auditivo resulta de plantear:

$$L_{umbral} = 10 \times \log\left(\frac{20\times10^{-6}}{20\times10^{-6}}\right)^2 = 10 \times \log\,(1)^2 = 0\ dB$$

Interesa observar que hablar de un nivel sonoro de 0 dB *no* implica ausencia de sonido, sino que el sonido que genera un nivel de 0 dB tiene la mínima presión que habitualmente es capaz de

detectar un oído humano sano de 18 años. En consecuencia, también existen valores negativos de niveles de presión sonora expresados en dB, que corresponden a presiones menores que 20 x 10^{-6} Pa.

El nivel de presión sonora para el umbral del dolor resulta de:

$$L_{dolor} = 10 \times \log\left(\frac{200}{20 \times 10^{-6}}\right)^2 = 10 \times \log\left(\frac{20 \times 10}{20 \times 10^{-6}}\right)^2 = 10 \times \log\left(10^7\right)^2 = 10 \times \log\left(10^{14}\right) = 140\ dB$$

Entonces, el rango audible para el oído humano se sitúa entre 0 dB *(umbral de la audición o de la percepción)* y 140 dB *(umbral del dolor)*. Si se tomara 20 Pa como presión correspondiente al umbral del dolor, entonces este nivel sería de 120 dB.

El mínimo cambio perceptible por el oído es de alrededor de 1 dB. Un aumento de 3 dB corresponde a duplicar la presión sonora; pero para que el sonido, de forma subjetiva, parezca ser significativamente más alto, se requiere un aumento de entre 8 y 10 dB.

1.11 Nivel de Potencia Acústica y Nivel de Intensidad Acústica

Más allá de que se trabaja con niveles de presión sonora, es bueno tener presente que lo que interesa conocer es lo que ocurre con la energía acústica o, más precisamente, con el flujo de energía acústica que interesa controlar.

La potencia acústica es una característica de la fuente emisora, por lo que el nivel de potencia acústica también lo es. El nivel de potencia debería ser una característica que los fabricantes / proveedores de equipos, maquinaria, vehículos, etc., proporcionaran a los clientes, tanto en escala A como en bandas de frecuencias. El nivel de potencia acústica se escribe como: $L_W = 10 \log\left(\frac{W}{W_0}\right)$

El nivel de intensidad acústica, por su parte, resulta ser: $L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$

Operando, puede verse que, en un mismo medio de propagación, $L_I = L_p$.

La potencia puede expresarse como I x S. Por lo tanto, operando y tomando en cuenta que la superficie de referencia es 1 m^2, resulta:

$$L_W = 10 \log\left(\frac{I}{I_0} \times \frac{S}{S_0}\right) = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) + 10 \log\left(\frac{S}{S_0}\right) = L_I + 10 \log(S) = L_p + 10 \log(S)$$

2 Propagación del sonido en campo libre

La propagación del sonido en campo libre, es decir, abierto y sin obstáculos, depende del tipo de fuente emisora que se esté considerando.

2.1 Divergencia esférica

Si la fuente emisora admite ser representada como fuente omnidireccional e isótropa (es decir, de dimensiones despreciables, que emite en todas las direcciones y que lo hace en forma homogénea en todas ellas), la propagación se dará según esferas de radio progresivamente mayor de modo que la energía acústica emitida se distribuirá homogéneamente en superficies esferas concéntricas:

$$L_W = L_p + 10\log(4\,\pi\,r^2) = L_p + 10\log(r^2) + 10\log(4\,\pi) = L_p + 10\log(r^2) + 11$$

Así, la energía sonora irradiada por la fuente atravesará sucesivamente superficies de área $4\pi r^2$, con r creciente. En consecuencia la intensidad (en tanto flujo de energía a través de una superficie por unidad de tiempo) resultará inversamente proporcional a r^2. A esta ley de decaimiento de la intensidad sonora inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente, se le llama *divergencia esférica*.

Esto permite calcular el nivel sonoro L_{r1} a una cierta distancia r_1 de una fuente conociendo el nivel sonoro L_{r0} a una distancia r_0. En efecto, si se expresa la potencia acústica de la fuente y el flujo de energía acústica que atraviesa la superficie de esferas de radio r_0 y r_1, el decaimiento de los niveles sonoros resultará:

$$L_w = L_{p,r0} + 10 \log r_0^2 + 11 = L_{p,r1} + 10 \log r_1^2 + 11$$

Operando:

$$L_{p,r1} = L_{p,r0} + 10 \log r_0^2 - 10 \log r_1^2$$

$$L_{p_{r1}} = L_{p_{r0}} + 10\log\left(\frac{r_0^2}{r_1^2}\right)$$

La expresión más usual, suponiendo que r_1 es mayor que r_0, es la siguiente:

$$L_{p_{r1}} = L_{p_{r0}} - 10\log\left(\frac{r_1^2}{r_0^2}\right)$$

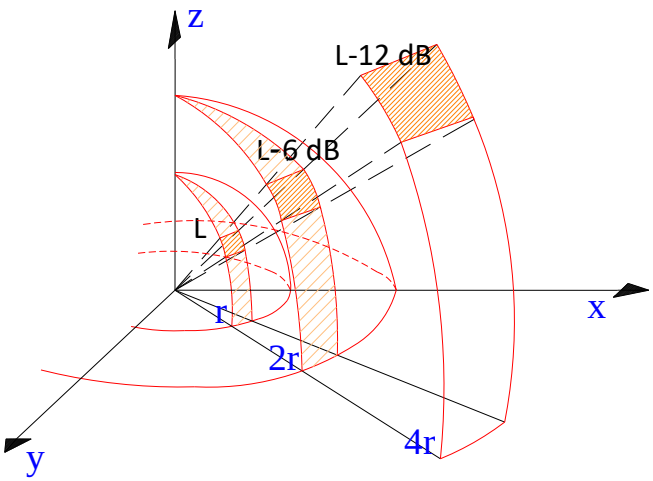


Figura 2-1. Divergencia esférica

Entonces, si se considera la energía acústica que atraviesa la superficie de dos esferas concéntricas de radios *r* y *2r* (Figura 2-), resulta:

$$L_{p_{2r}} = L_{p_r} - 10\log\left[\frac{(2r)^2}{r^2}\right] = L_{p_r} - 10\log(4) = L_{p_r} - 10\log\,(2^2) = L_{p_r} - 20\log(2) =$$

$$= L_{p_r} - 20 \times 0{,}3$$

Genéricamente: *cuando se considera divergencia esférica, cada vez que la distancia a la fuente se duplica el decaimiento obtenido es de 6 dB*.

$$L_{p_{2d}} = L_{p_d} - 6 \text{ [dB]}$$

2.2 Divergencia cilíndrica

Si, en cambio, la fuente emisora se asemejara a una fuente lineal de longitud infinita, en cada tramo de longitud l la propagación se dará a través de la superficie de cilindros coaxiales con eje en la fuente:

$$L_W = L_p + 10\log(2\,\pi\,r) = L_p + 10\log(r) + 10\log\,(2\,\pi) = L_p + 10\log(r) + 8$$

Si la fuente en cuestión tiene una potencia acústica por unidad de longitud L_W, efectuando un tratamiento análogo al anterior se tiene que la energía sonora irradiada por la fuente por unidad de longitud l atravesará sucesivamente superficies de área 2πrl, con r creciente, de modo que la intensidad acústica (en tanto flujo de energía a través de una superficie por unidad de tiempo) resulta inversamente proporcional a *r*. Esta ley de decaimiento de la intensidad sonora inversamente proporcional a la distancia a la fuente, se designa como *divergencia cilíndrica*.

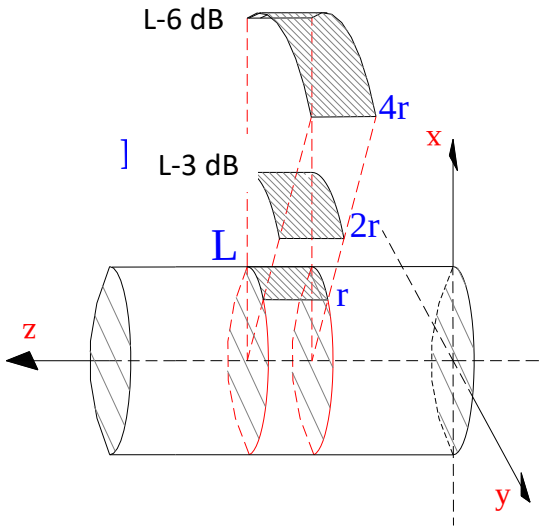


Figura 2-2. Divergencia cilíndrica

A partir de la potencia de la fuente por unidad de longitud, se puede escribir:

$$L_w = L_{p,r0} + 10 \log r_0 + 8 = L_{p,r1} + 10 \log r_1 + 8$$

$$L_{p,r1} = L_{p,r0} + 10 \log r_0 - 10 \log r_1$$

$$L_{p_{r1}} = L_{p_{r0}} - 10 \log \left(\frac{r_1}{r_0}\right)$$

Si se consideran dos cilindros coaxiales de radios *r* y *2r* (Figura 2-), resultará que el decaimiento de los niveles sonoros al pasar de uno al otro será de 3 dB:

$$L_{p_{2r}} = L_{p_r} - 10 \log \left(\frac{2r}{r}\right) = L_{p_r} - 10 \log (2) = L_{p_r} - 3\ dB$$

Genéricamente: *cuando se considera divergencia cilíndrica, cada vez que la distancia a la fuente se duplica el decaimiento obtenido es de 3 dB*.

$$L_{p_{2d}} = L_{p_d} - 3 \text{ [dB]}$$

3 Operaciones con niveles sonoros

3.1 Suma de niveles de presión sonora

A menudo se presenta en la práctica la necesidad de conocer el nivel de ruido que resultaría del funcionamiento simultáneo de dos fuentes, como suma de dos niveles de ruido. Por tratarse de magnitudes logarítmicas, los niveles no se pueden sumar algebraicamente. Esto se debe a que cuando se suman niveles de presión sonora en un punto, en realidad se está tratando de cuantificar la intensidad acústica en ese punto debido al aporte de dos o más fuentes, es decir, saber cuánta energía acústica atraviesa una cierta superficie ubicada en el punto de interés debido al funcionamiento de las fuentes en cuestión.

Supóngase que se tiene dos fuentes de ruido 1 y 2, que son no correlacionadas ni coherentes (es decir, que no emiten en fase) y cuyas intensidades acústicas son respectivamente I_1 e I_2:

$$I_1 = \frac{p_1^2}{\rho_0 c}\ ;\ I_2 = \frac{p_2^2}{\rho_o c}$$

La energía acústica I_T en el punto en cuestión resulta de la suma de la energía que aporta cada una de las fuentes. Como $I_T = I_1 + I_2$, se puede escribir:

$$I_T = I_1 + I_2 \Rightarrow \frac{p_T^2}{\rho_o c} = \frac{p_1^2}{\rho_o c} + \frac{p_2^2}{\rho_o c} \Rightarrow p_T^2 = p_1^2 + p_2^2$$

con lo cual el nivel de presión total debido a las dos fuentes será:

$$L_T = 10 \log \left[\frac{p_T}{p_0}\right]^2 = 10 \log \left[\frac{p_1^2 + p_2^2}{p_o^2}\right] = 10 \log \left[\frac{p_1^2}{p_o^2} + \frac{p_2^2}{p_0^2}\right]$$

Como primer punto a destacar, por propiedades de los logaritmos resulta que el nivel suma NO es la suma de los niveles de las fuentes individuales:

$$L_T \neq L_1 + L_2$$

Ahora bien, a partir de la definición de los niveles de presión de las fuentes 1 y 2:

$$\left[\frac{{p_1}^2}{{p_0}^2}\right] = 10^{\frac{L_1}{10}} \quad y \quad \left[\frac{{p_2}^2}{{p_0}^2}\right] = 10^{\frac{L_2}{10}}$$

el nivel de presión sonora total L_T resulta ser:

$$L_T = 10\log\left[10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}}\right]$$

Por analogía al cálculo realizado en la suma de dos niveles se obtiene la siguiente expresión para sumar *k* niveles sonoros:

$$L_T = 10\log\sum_{1}^{k}\left(10^{\frac{L_{pi}}{10}}\right)$$

Una forma más rápida para hacer esta composición cuando no se dispone en el momento de una calculadora, es aplicar el ábaco de la figura 3-1 con el siguiente procedimiento:

1. Hallar la diferencia aritmética entre los niveles L_1, L_2 a sumar. Si se supone L_2 mayor L_1, se debe obtener el valor de (L_2 - L_1).

2. Encontrar esa diferencia en el eje horizontal del gráfico. Trasladarse en vertical desde ese punto hasta interceptar la curva, y después leer el valor correspondiente en el eje vertical a la izquierda.

3. Sumar el valor resultante en el eje vertical al nivel de la fuente más ruidosa (L_2). Ése es el valor de la suma de los niveles sonoros debidos a las dos fuentes de ruido.

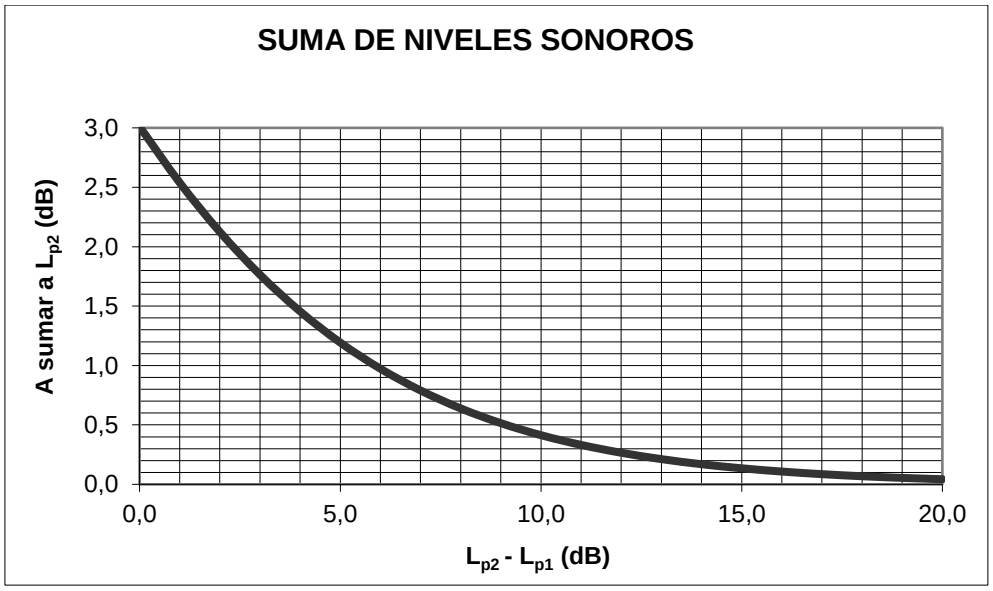
Nótese que si se tienen dos niveles sonoros iguales, su diferencia es cero, por lo que aplicando el método gráfico corresponde sumar un valor de 3 dB para obtener el nivel total L_T. Analíticamente esto resulta de:

$$L_T = 10\log\left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}\right) = 10\log\left(2 \times 10^{L_1/10}\right) = 10\left[\log(2) + \log\left(10^{L_1/10}\right)\right] =$$
$$= 10\ \log\ (2) + L_1 \cong L_1 + 3$$

Por otra parte, si la diferencia entre los dos niveles es superior a 10 dB, la contribución de la fuente menos ruidosa puede, a los efectos prácticos, ser descartada ya que su contribución es inferior a 0,5 dB. Esto se ve fácilmente en el ábaco de la figura 3-1.

Cuando hay que sumar los niveles de tres o más fuentes de ruido, se repiten los pasos anteriores sustituyendo cada vez dos fuentes por el resultado de su suma; así se tiene siempre sumas de dos niveles cada vez. Se sugiere comenzar por las fuentes de mayor nivel sonoro, de modo que cuando la suma sea mayor en 10 dB o más que los niveles de las fuentes que faltan sumar, en la práctica se puede suponer que su contribución no será significativa.

Figura 3-1: Ábaco para suma de niveles sonoros (sup. $L_{p,2} \geq L_{p,1}$)



3.2 Diferencia de dos niveles de presión sonora

Otro caso frecuente que se presenta en la práctica es la necesidad de calcular el nivel de presión sonora de una fuente sonora, en un recinto abierto o cerrado, en el cual existe un nivel de presión sonora correspondiente al ruido ambiente. En este caso habría que hallar la diferencia entre los niveles de presión correspondiente a dos mediciones (ruido ambiente con fuente sonora y sin fuente sonora) para calcular el nivel de presión sonora de la fuente aislada funcionando sola.

Razonando como en el caso de la suma, la operación de resta de niveles se realiza considerando las intensidades acústicas en el punto de interés. Éstas están relacionadas entre sí según $I_2 = I_T - I_1$, siendo:

$$I_2 = I_T - I_1 \Rightarrow \frac{p_2^2}{\rho_o c} = \frac{p_T^2}{\rho_o c} - \frac{p_1^2}{\rho_o c} \Rightarrow p_2^2 = p_T^2 - p_1^2$$

Se puede despejar cada término en función de su correspondiente nivel:

$$\left[\frac{{p_T}^2}{{p_0}^2}\right] = 10^{\frac{Lp_T}{10}} \quad y \quad \left[\frac{{p_1}^2}{{p_0}^2}\right] = 10^{\frac{Lp_1}{10}}$$

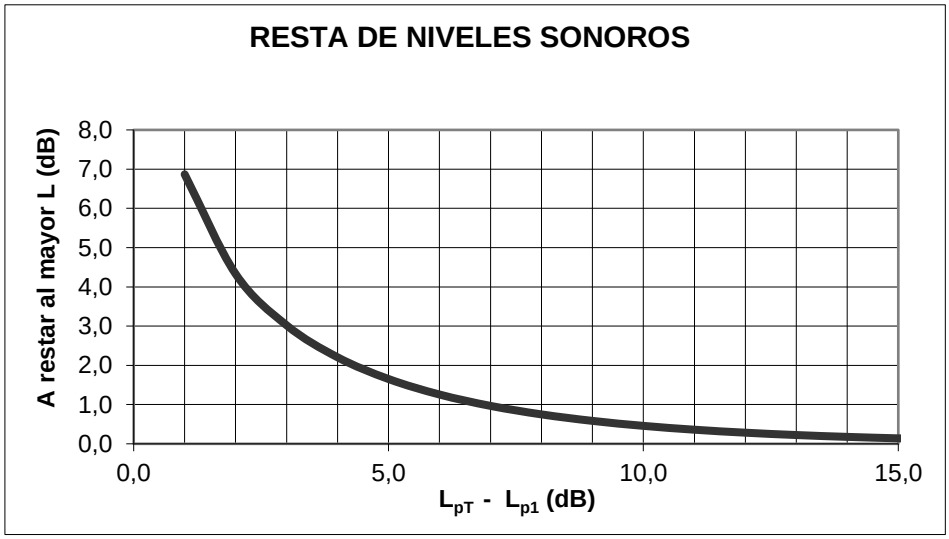
Sustituyendo en la expresión de I_2 y aplicando la definición de *nivel*, resulta ser:

$$L_{I_2} = 10 \log\left(\frac{p_T^2 - p_1^2}{p_0^2}\right) = L_{p_2}$$

$$L_{p_2} = 10 \times \log\left[10^{\frac{Lp_T}{10}} - 10^{\frac{Lp_1}{10}}\right]$$

También puede usarse el ábaco que se presenta en la Figura mediante un procedimiento análogo al utilizado en la suma de niveles sonoros. En este caso se ingresa al gráfico con la diferencia aritmética entre los niveles dados en el eje horizontal, se sube en vertical hasta la curva y se lee el valor correspondiente en el eje vertical. Ése es el valor que debe restarse aritméticamente al nivel mayor de los dos dados *(L_T)* para obtener el nivel sonoro de la segunda fuente. Si la diferencia entre la medida con fuente y sin fuente es menor a 3 dB (o sea, $|L_T - L_1| \leq 3$ dB) el ruido de fondo es demasiado alto para lograr un valor confiable (el error y el valor buscado son muy próximos); el nivel de ruido buscado no se puede hallar hasta que el ruido de fondo haya sido reducido o bien debe asumirse que su aporte es similar al del ruido de fondo. Si la diferencia es mayor a 10 dB, el ruido de fondo puede ser ignorado.

Figura 3-2: **Ábaco para restar niveles sonoros**



4 Parámetros representativos en un intervalo de tiempo

4.1 Nivel sonoro continuo equivalente (nivel continuo equivalente, nivel sonoro equivalente, nivel equivalente, L_{eq})

El ***Nivel Sonoro Continuo Equivalente*** o ***Nivel Equivalente L_{eq}*** es un parámetro que se ha adoptado internacionalmente para describir con un solo valor numérico, desde el punto de vista energético, la totalidad de los niveles de presión sonora que han tenido lugar en un intervalo de tiempo determinado. Como es un equivalente energético, el L_{eq} penaliza fuertemente los niveles de presión sonora elevados, aún si son de corta duración.

El L_{eq} es el nivel de presión sonora correspondiente a un sonido de nivel de presión sonora constante cuya duración es igual al intervalo de tiempo considerado y que haría llegar a la membrana del tímpano la misma cantidad de energía que la secuencia de sonidos que efectivamente tuvo lugar en ese intervalo de tiempo.

El L_{eq} en un intervalo de tiempo $T = [t_1, t_2]$ admite ser expresado matemáticamente de la siguiente forma:

$$L_{eq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2} \, dt \right]$$

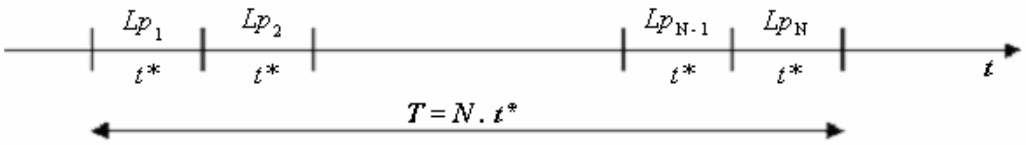
Por tratarse de una integral, las operaciones de adición, diferencia, comparación, etc. se pueden realizar en forma sencilla. Esto es de gran utilidad si se busca, por ejemplo, un nivel sonoro representativo de un intervalo de tiempo en el que se pueden reconocer distintas actividades a cada una de las cuales se le puede asignar un nivel sonoro $L_{eq,i}$ y una duración t_i.

En la práctica, la aparente dificultad que implica conocer los valores en forma continua en el tiempo para poder aplicar el operador "*integral*", se salva fácilmente:

1. Cuando se dispone de un instrumento integrador, que da directamente el valor del L_{eq} en el intervalo considerado sin necesidad de realizar ningún tipo de cálculo.

2. Cuando se dispone de *N* lecturas discretas de nivel de presión sonora L_{pi} que son respectivamente representativas de intervalos de tiempo de igual duración t^* con $t^* = T/N$, caso en el que el valor del L_{eq} se puede obtener empleando la siguiente expresión:

$$L_{eq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} 10^{0,1 \, L_{pi}} \right]$$



3. Cuando se dispone de *N* lecturas discretas de nivel de presión sonora L_{pi} que son respectivamente representativas de intervalos de tiempo de duración t_i de modo que se cumple $\sum_{i=1}^{N} t_i = T$.

   En este caso, el valor del L_{eq} se puede obtener aplicando la siguiente expresión:

$$L_{eq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \left(\sum_{i=1}^{N} \left(t_i \times 10^{0,1 L_{p_i}} \right) \right) \right]$$

   Esta forma de cálculo suele ser de gran utilidad cuando se analizan procesos compuestos por diferentes operaciones más o menos largas en las que el nivel de presión sonora se mantiene aproximadamente constante, ya que en caso de no poder medir todo el tiempo o de que sea suficiente y/o válido aplicar esta simplificación, bastará obtener un nivel de presión sonora que permita caracterizar cada operación y luego extrapolar ese valor ponderando su duración en el total del proceso.

4.2 Niveles de Permanencia

Además de poder emplear un valor único (L_{eq}) para describir energéticamente la secuencia de sonidos que efectivamente tiene lugar en un intervalo de tiempo, puede ser de interés conocer

cuánto tiempo duran los distintos niveles de presión sonora registrados en relación a la duración del intervalo de tiempo considerado. Esto conduce al concepto de *niveles de permanencia* (en general conocidos como *percentiles*)[8].

Los ***niveles de permanencia*** son los niveles sonoros que son superados durante un cierto porcentaje del tiempo de muestreo y durante no más de ese porcentaje. Así, el nivel de permanencia 10 % o L_{10} es el valor que es superado el 10 % del tiempo de muestreo; el nivel de permanencia 90 % o L_{90} es el valor que es superado el 90 % del tiempo de muestreo.

A diferencia del L_{eq}, que es un parámetro energético, los niveles de permanencia L_N son parámetros estadísticos. Por lo tanto, están estrechamente relacionados con la muestra de la que provienen, es decir, con la secuencia de niveles sonoros sobre los que se determinaron. Esto inhabilita a realizar con ellos el mismo tipo de operaciones que se puede realizar con niveles equivalentes, salvo que previamente se puedan realizar las correspondientes pruebas estadísticas que acrediten que todas las muestras a considerar pertenecen, para un cierto nivel de confianza predeterminado, a una misma población original. Dicho de otra forma, si al aplicar esas pruebas estadísticas las muestras resultan ser comparables, entonces representan el mismo fenómeno físico.

Los niveles de permanencia se asocian a un % de tiempo; si no se tiene un valor que tenga asociado exactamente ese %, debe tomarse el % inmediatamente mayor que el buscado. Salvo que se disponga de una abundante cantidad de datos (por lo menos 100), no es conveniente interpolar.

4.3 Curvas de permanencia

Con los niveles de permanencia obtenidos en una medición, se puede construir la correspondiente ***curva de permanencia***. Esta curva se construye colocando en el eje de las abscisas el nivel de permanencia (1 %, 2 %, hasta 100 %) y en el eje de las ordenadas, el correspondiente nivel de presión sonora. Cuanto mayor sea el número de niveles de permanencia que se empleen para definir la curva, mayor será la precisión y utilidad de ésta.

La forma de la curva de permanencia da información acerca de la variabilidad de los niveles de presión sonora en el intervalo de tiempo considerado: una curva muy plana advierte sobre niveles muy uniformes, con poca variación. A mayor pendiente señalará mayor variabilidad de los niveles sonoros registrados.

Para un mismo valor de L_{eq}, por lo general los ruidos más variables generan mayor nivel de molestia que los constantes.

5 Instrumentos de Medición

Los principales instrumentos de medición en materia de niveles sonoros se designan como sonómetros. Otros instrumentos de uso corriente son los analizadores de espectro y los dosímetros y, entre los instrumentos auxiliares, los calibradores.

[8] De acuerdo con la terminología que se aplica en estadística, los percentiles son los valores que corresponden a los porcentajes complementarios de los niveles de permanencia.

5.1 Sonómetro

Los instrumentos de medición que se emplean para cuantificar niveles sonoros reciben el nombre de ***sonómetros***; también se los conoce popularmente como decibelímetros. Su fiabilidad y los parámetros que son capaces de relevar dependen del tipo de instrumento de que se trate.

5.1.1 Clases de sonómetros

Los instrumentos se categorizan según su precisión de acuerdo con normas internacionales. En nuestro país se aplican las normas europeas, por lo que en equipos de medición de ruido corresponde considerar los siguientes estándares:

- UNE-EN IEC 61672:2013 "Electroacústica – Sonómetros"
- UNE-EN IEC 61252:1993 "Electroacústica - Especificaciones para medidores personales de exposición sonora"
- UNE-EN IEC 60942:2003 "Electroacústica - Calibradores acústicos"

La norma UNE-EN IEC 61672 unificó en 2002 las normas IEC 651/79 y 804/85 (homologadas respectivamente por las UNE-EN 60651 y UNE-EN 60804). Actualmente las funcionalidades y desempeño que debe tener un sonómetro están establecidas en la norma IEC 61672-1:2013.

La IEC 651/79 consideraba tres categorías de instrumentos, que designaba como *Tipos* 1, 2 y 3. En la norma IEC 61672 se conservan dos categorías, que se designan como *Clases*.

Los sonómetros de *Clase 1* son instrumentos de precisión (± 0,7 dB entre 100 Hz y 4 kHz) aptos para todo tipo de mediciones de campo, incluyendo las mediciones de certificación para la aplicación de legislaciones. Los de *Clase 2* son de menor precisión (± 1,0 dB entre 100 Hz y 1,25 kHz), y se utilizan en mediciones generales de comprobación, o cuando la fluctuación o falta de replicabilidad de un determinado ruido hace imposible una determinación precisa.

	Clase 1	**Clase 2**
Clase según Norma IEC 61672	± 0,7 dB	± 1,0 dB

Tabla 5-1: Precisión de sonómetros de acuerdo con IEC 61672:2013

Entre las modificaciones que introduce la edición 2013 de la UNE-EN IEC 61672, se debe señalar:

- Se quita del cuerpo de la norma la respuesta temporal impulsiva como respuesta normalizada, dado que se entiende que tiene baja correlación con eventos reales de carácter impulsivo.
- Se quitan del cuerpo de la norma las escalas de ponderación frecuencial B y D, por considerarlas obsoletas.

5.1.2 Acerca del Micrófono

La electrónica de los instrumentos de medición de niveles sonoros es relativamente simple. Lo que define la calidad del instrumento es su micrófono, ya que de él dependerá la precisión de las mediciones.

Un micrófono es un transductor acústico-mecánico-eléctrico, es decir, un dispositivo que convierte una señal acústica en una señal eléctrica por medios mecánicos. Esta conversión debe efectuarse con la mayor precisión, de forma que la señal eléctrica obtenida sea un fiel reflejo de la señal acústica original. Otro punto a tener en cuenta en lo relativo al micrófono es su rango dinámico (diferencia entre los niveles máximo y mínimo medibles). Hoy día se tiende a que los micrófonos permitan efectuar mediciones en un rango dinámico lo más amplio posible (por ejemplo, de 20 dB a 130 dB).

5.1.3 Curvas de ponderación o compensación frecuencial

Para poder reproducir razonablemente el comportamiento del oído en relación a las distintas frecuencias e intensidades, se desarrollaron varias curvas de ponderación frecuencial de las que en la actualidad se mantienen en uso las curvas A y C. Los valores medidos intercalando las curvas de compensación mencionadas se designan respectivamente como *nivel de presión sonora ponderado en escala A y nivel de presión sonora ponderado en escala C,* y se expresan en dBA y dBC (también abreviados a veces como dB(A) y dB(C)). La notación actual de las normas ISO indica la escala de ponderación como un subíndice que acompaña a la letra L (del inglés *level*), expresando los valores siempre en dB. Así, un nivel sonoro expresado en escala de ponderación A se anotará como L_A y se expresará en dB.

Aunque la tendencia actual para indicar que los niveles sonoros están en dBA es aclararlo como un subíndice (por ejemplo, $L_{p,A}$ o $L_{eq,A}$):

$$L_{p,A} = 10 \cdot \log \frac{p_A^2}{p_0^2}$$

de todos modos, la vieja usanza de anotar la ponderación junto a las unidades (por ejemplo, dB(A) o dBA) se mantiene vigente.

Cuando no se aplican ponderaciones frecuenciales se dice que se aplica la escala Z, antes llamada “escala lineal”; los valores así medidos se expresan en dBZ.

Las características más destacables de la escala de ponderación A son: la gran atenuación que produce sobre los sonidos de bajas frecuencias (graves); y la amplificación de los sonidos en el intervalo de 1000 Hz y 5000 Hz. La norma IEC 61672-1:2013 indica que todos los sonómetros deben tener incorporado el filtro de ponderación frecuencial A.

La curva *C* se mantiene en uso pero más que por su aplicación en sí misma, por la comparación con los niveles de presión sonora, expresados en dBA y dBC, que describen una misma señal. Dado que la curva A atenúa las bajas frecuencias y la curva C no, si las lecturas en dBA y dBC son similares, es porque el contenido de la señal en bajas frecuencias no es importante. Si, en cambio, la lectura en dBC es mayor que la lectura en dBA y la resta aritmética de los niveles (C – A) toma un valor de 10 dB o más, es un indicador de que la señal tiene un elevado contenido energético en bajas frecuencias.

En la Respuesta temporal

Cuando se miden niveles sonoros, los valores que arroja el sonómetro están afectados por el tiempo que media entre dos lecturas sucesivas del instrumento. Si bien habitualmente los

sonómetros con despliegue digital muestran valores cada intervalos regulares –que en general suelen ser de 1 segundo-, el instrumento puede estar adquiriendo datos durante períodos de tiempo muy inferiores al que emplea la unidad de despliegue, y procesándolos (integrándolos) para obtener el valor que luego mostrará en la pantalla.

se presentan los valores que definen las curvas A y C para las bandas de tercios de octava normalizadas (Norma IEC 61.672). Los valores correspondientes a las bandas de octava normalizadas están resaltados en las filas sombreadas.

Tabla 5-2: **Correcciones que definen las curvas A, C y Z en bandas de octava y de tercio de octava**

Frecuencia [Hz]	Curva A [dB]	Curva C [dB]	Curva Z [dB]
10	−70,4	−14,3	0
12,5	−63,4	−11,2	0
16	−56,7	−8,5	0
20	−50,5	−6,2	0
25	−44,7	−4,4	0
31,5	−39,4	−3,0	0
40	−34,6	−2,0	0
50	−30,2	−1,3	0
63	−26,2	−0,8	0
80	−22,5	−0,5	0
100	−19,1	−0,3	0
125	−16,1	−0,2	0
160	−13,4	−0,1	0
200	−10,9	0,0	0
250	−8,6	0,0	0
315	−6,6	0,0	0
400	−4,8	0,0	0
500	−3,2	0,0	0
630	−1,9	0,0	0
800	−0,8	0,0	0
1000	0,0	0,0	0
1250	0,6	0,0	0
1600	1,0	−0,1	0
2000	1,2	−0,2	0
2500	1,3	−0,3	0
3150	1,2	−0,5	0
4000	1,0	−0,8	0
5000	0,5	−1,3	0
6300	−0,1	−2,0	0
8000	−1,1	−3,0	0
10000	−2,5	−4,4	0
12500	−4,3	−6,2	0
16000	−6,6	−8,5	0
20000	−9,3	−11,2	0

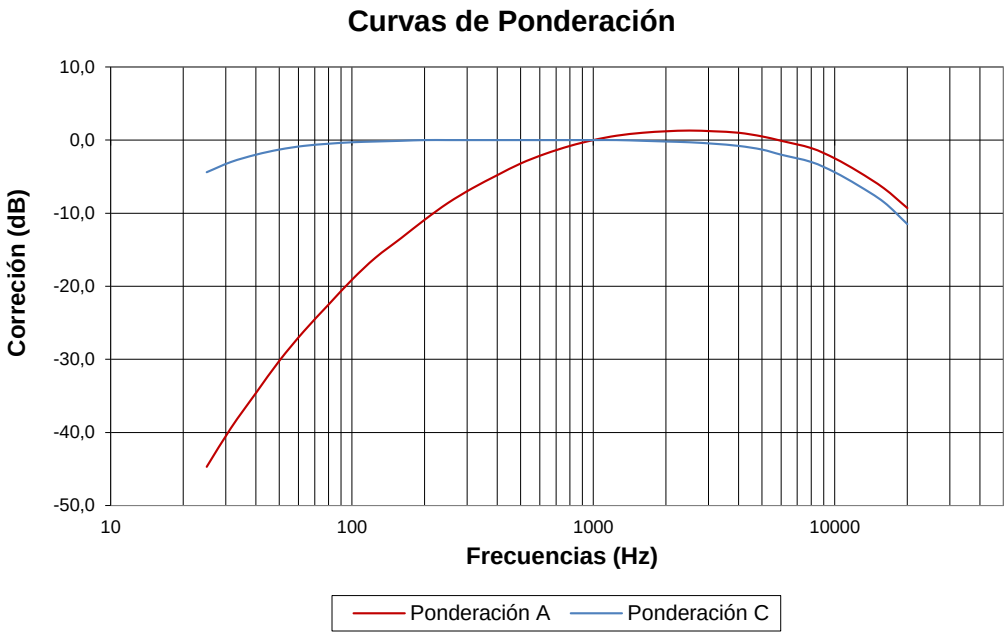


Figura 5-1. Curvas de ponderación A y C. Para cada frecuencia, el valor de la ordenada representa la corrección aditiva a aplicar al nivel de presión sonora en esa frecuencia para obtener su nivel ponderado en la escala deseada. En 1.000 Hz todas las curvas pasan por 0 dB.

5.1.4 Respuesta temporal

Cuando se miden niveles sonoros, los valores que arroja el sonómetro están afectados por el tiempo que media entre dos lecturas sucesivas del instrumento. Si bien habitualmente los sonómetros con despliegue digital muestran valores cada intervalos regulares –que en general suelen ser de 1 segundo-, el instrumento puede estar adquiriendo datos durante períodos de tiempo muy inferiores al que emplea la unidad de despliegue, y procesándolos (integrándolos) para obtener el valor que luego mostrará en la pantalla.

Cuanto mayor es el tiempo de integración, menos influencia tienen las fluctuaciones instante a instante de la presión sobre el valor del nivel sonoro continuo equivalente en el intervalo considerado. En cambio, cuanto más corto es el período de integración, más influencia tienen los picos de presión (fluctuaciones instantáneas) sobre el valor global que se obtendrá. En otras palabras: cuanto mayor sea el *tiempo de integración* (el tiempo que transcurre entre dos datos consecutivos adquiridos internamente por el instrumento), menos sensible es el valor de la presión eficaz a las fluctuaciones propias del sonido que se trata de medir. Esto lleva a considerar la necesidad de establecer al menos dos tipos de respuesta, en función del tipo de fenómeno que se quiera evidenciar con la medición. Surgen así las denominadas respuesta *rápida* y respuesta *lenta*.

Respuesta lenta (Slow): un instrumento trabaja con respuesta lenta cuando emplea una constante de tiempo de 1 segundo. Este tipo de respuesta tiene poca aplicación actualmente, pero por lo general se utilizaba para evaluar ruidos estables.

Respuesta rápida (Fast): un instrumento trabaja con respuesta rápida cuando emplea una constante de tiempo de 125 ms (milisegundos), o sea de un octavo de segundo.

La elección de la ponderación de tiempo en una medición depende de la variabilidad de la señal del sonido, y de los requisitos de la norma, protocolo, reglamentación, etc. a seguir para realizar esa medición o ensayo. Algunas normas de medición especifican ponderación temporal lenta y otras, ponderación temporal rápida.

Si la señal sonora es estable, es decir que varía en un intervalo de no más de 5 dB, el valor final obtenido es independiente de la constante de tiempo seleccionada. En cambio, si los niveles sonoros son variables (o sea, su nivel varía en un intervalo de más de 5 dB de amplitud), se recomienda medir con constante de tiempo *fast* para evitar subestimaciones. Por lo tanto, cuando no se cuenta con una disposición explícita en este sentido, es aconsejable trabajar con respuesta temporal *fast*.

5.2 Analizador de espectro

Cuando se necesita conocer la distribución espectral de la energía acústica, no es suficiente con informar un valor (C – A): se debe recurrir a un ***analizador de espectro***, que puede estar incorporado en el sonómetro o acoplarse a él. Lo que cambia en presencia de un analizador de espectro es que, en vez de tener incorporado uno o más filtros de ponderación preestablecidos (como A y C, por ejemplo), se tiene ahora uno o más *filtros pasabanda*, es decir, filtros que permiten pasar las señales comprendidas en una banda relativamente estrecha de frecuencias y rechazan las restantes. Al ser estos filtros muy selectivos en frecuencia, permiten un análisis detallado del contenido espectral de la señal sonora de interés. Los conjuntos de filtros más usuales son los de Banda de Octava (BO) y de Banda de Tercio de Octava (BTO); en el primer caso, las bandas normalizadas que cubren el rango audible son 11, con frecuencias centrales entre 16 Hz y 16.000 Hz. En el caso de analizadores de BTO, se tienen 33 BTO en el rango audible, con frecuencias centrales comprendidas entre 12,5 Hz y 20.000 Hz.

Originalmente los análisis e realizaban en forma secuencial, es decir, recorriendo una a una las bandas de interés para obtener los niveles de presión sonora y eventualmente otros parámetros de interés. El uso de analizadores de espectro en tiempo real ha significado un verdadero avance en materia de mediciones de niveles de presión sonora: no sólo se reduce sensiblemente el tiempo de trabajo de campo sino que también se tiene la seguridad de que el análisis se realiza sobre una misma muestra de ruido de la que se analiza la composición espectral en todas las bandas de interés simultáneamente.

5.3 Dosímetro

El ***dosímetro*** o ***medidor de exposición personal*** permite conocer la *dosis de ruido* a que está expuesto un individuo; se emplea en ambientes laborales. Los requerimientos que deben satisfacer estos medidores están especificados en la norma IEC 61252:1993.

La dosis de ruido es una medida de la exposición al ruido a que está sometida una persona; suele expresarse como un porcentaje de la exposición al ruido diaria máxima permisible, que por definición se toma como 100 %. Ese nivel se programa en el equipo, ya que varía según la normativa o país que se considere.

5.4 Calibradores

Primero es necesario aclarar que los calibradores acústicos de campo no se emplean para ***calibrar*** los equipos de medición, sino simplemente para ***verificar*** o ***comprobar*** su ajuste. La ***calibración*** debe realizarse en un laboratorio calificado, respondiendo a un protocolo normalizado y con trazabilidad.

Los calibradores de campo suelen ser de tipo altavoz. Emiten una señal acústica sinusoidal (un tono puro) a una (o más) frecuencia(s) y nivel(es) sonoro(s) determinado(s). El nivel sonoro real producido por el calibrador ha de ser determinado mediante una calibración separada (o sea, periódicamente hay que *calibrar el calibrador*).

Aplicada esta señal sobre el micrófono, se debe producir una cifra concreta en el indicador. Entonces, el proceso de *calibración en campo* de un instrumento consiste en ajustar ligeramente la ganancia de su amplificador de entrada de modo de compensar posibles variaciones. Este ajuste se realiza actuando sobre un potenciómetro, accesible desde afuera del equipo con un pequeño destornillador. Para hacerlo, se requiere personal calificado.

Si además del sonómetro se están empleando otros dispositivos, como por ejemplo aparatos de grabación, todos deben ser sometidos a una comprobación/verificación (calibración de campo) antes y después de cada medición; esto puede ser incluso un requisito legal. Sin una calibración válida de la sensibilidad del sistema de medición, los resultados del ensayo podrían ser cuestionados posteriormente.

6 Normativa sobre contaminación acústica en nuestro país

6.1 Jurisdicción Nacional

En diciembre de 2004 se sancionó la Ley de Protección Acústica Nº 17.852, cuyo objeto se enuncia en su primer artículo:

> *"Esta ley tiene por objeto la prevención, vigilancia y corrección de las situaciones de contaminación acústica, con el fin de asegurar la debida protección a la población, otros seres vivos, y el ambiente contra la exposición al ruido."*

Y en su artículo tercero define "contaminación acústica" de la siguiente forma:

> *"Se entiende por contaminación acústica a los efectos de esta ley, la presencia en el ambiente de ruidos, cualquiera sea la fuente que los origine, cuyos niveles superen los límites que establezca la reglamentación."*

Aún no hay ninguna reglamentación sancionada que establezca estándares de emisión e inmisión acústica a nivel nacional. Sin embargo, tras un largo período de discusión, en 2013 el grupo GESTA-Acústica (Grupo de Estandarización en Acústica) en el marco de la COTAMA elevó una propuesta técnica de reglamentación de la Ley Nº 17.852 que ya ha completado la instancia de manifiesto público. A partir de esa propuesta técnica, DINAMA ha elaborado Guías y Protocolos de Medición tanto para fuentes fijas como para vehículos.

6.2 Jurisdicción Departamental

De acuerdo con la Ley Orgánica Municipal, la gestión de todo lo relacionado con ruido y contaminación sonora en nuestro país es de competencia municipal. En consecuencia, cada Departamento tiene su propia ordenanza municipal sobre ruidos molestos, contaminación sonora o designación similar. En general, hay importantes carencias en materia normativa, tanto por faltantes como por incompatibilidades de diferente índole y por errores técnicos que, considerados al pie de la letra, conducirían a conflictos quizás mayores que los existentes.

Si bien algunas ordenanzas son muy similares entre sí, existen muchas variantes en el país tanto para los temas que consideran como para los valores límite que establecen. Las ordenanzas más nuevas tienen por lo general un espíritu más riguroso, aunque no siempre la redacción tiene la precisión que se deja entrever sería necesaria.

En la Tabla 7-1 se indican las Ordenanzas Departamentales vigentes en el país.

Tabla 6-1: Ordenanzas departamentales

Departamento	Normativa Departamental Vigente
Artigas	Decreto 2592 (16/06/1984)
Canelones	Resolución 7263 de diciembre de 2009. Decreto 5 de 01/10/2010
Cerro Largo	Decreto de 22 de Agosto de 1979; Decreto 13/1998 (17/11/1998); Decreto 19/2006 (27/07/2006).
Colonia	Decreto 9 (27/05/1994) de 10 de noviembre de 1993. Resolución 574/997 de 26/06/1997.
Durazno	Decreto 1190/1997.
Flores	Decreto 0432 (18/12/2002).
Florida	Decreto 16/96 (19/07/1996); Decreto 20/2002 (06/09/2002); Decreto 24/2008 (20/06/2008).
Lavalleja	Decreto Nº 2965 Ordenanza sobre ruidos molestos (2011)
Maldonado	Decreto 3865, 27 de abril de 2010. Ordenanza Sobre Ruidos Molestos.
Montevideo	Digesto Municipal. Resoluciones municipales diversas.
Paysandú	Decreto 6356 (28/05/1965).
Río Negro	Decreto 73 (27/06/1996); Decreto 87/2011 (9/12/2011); Decreto 93/2012 (24/02/12); Decreto 100/12 (13/04/12).
Rivera	Decreto 8888 (17/04/2001)
Rocha	Decreto 7 (15/12/1998); Decreto 11/2011, Decreto 12/2011, Decreto 9/2012 (2/10/2012)
Salto	Decreto 5945 (19/12/1997)
San José	Decreto 2816(09/11/1998); Resolución 1097/2007.
Soriano	Decreto 0292 (22/02/1996); Decreto 0.814 (21/05/1996); Decreto 4989 (23/11/2011); Decreto 2.276 (22/12/1981)
Tacuarembó	Ordenanza 02/2007, febrero de 2007
Treinta y Tres	Decreto 14/1982 (17/09/1982); Decreto 10/1997 (18/06/1998); Decreto 10/2000 (29/06/2000); Reglamento del Decreto 10/2000 (19/04/2001)

7 Correcciones para evaluar molestia por ruido

Las correcciones para representar cuán molestos pueden ser algunos tipos de ruido están contempladas en muchas normativas; también las ha incorporado la ISO en su norma 1996 sobre ruido ambiental.

Más allá de variantes, los componentes que se suelen considerar para aplicar términos de corrección son: la presencia de componentes impulsivos; la presencia de elevado contenido energético en bajas frecuencias; y la ocurrencia de tonos puros.

En lo que sigue se indica una de las posibles formas para calcular cada una de tales correcciones: la que se presenta en el Anexo IV del Real Decreto 1367 del Reino de España, sancionado en octubre de 2007.

7.1 Corrección por componentes impulsivos

La evaluación de la presencia de ruidos impulsivos durante un cierto período de tiempo *T*, se realiza mediante el siguiente procedimiento:

1. Se mide el nivel sonoro continuo equivalente con ponderación A y con respuestas temporales *Fast* e *Impulse* durante el tiempo *T* ($L_{AFeq,T}$ y $L_{AIeq,T}$).
2. Se calcula la diferencia aritmética ($L_{AIeq} - L_{AFeq}$).
3. Si ($L_{AIeq} - L_{AFeq}$) vale entre 10 dB y 15 dB, la penalización a aplicar será de 3 dB. Esto quiere decir que el valor a informar como equivalente de molestia será (L_{AFeq} + 3) dBA.
4. Si ($L_{AIeq} - L_{AFeq}$) vale 15 dB o más, la penalización a aplicar será de 6 dB. Esto quiere decir que el valor a informar como equivalente de molestia será (L_{AFeq} + 6) dBA.

Cabe señalar que, ante la reciente remoción de la respuesta temporal *Impulse* del cuerpo de la norma UNE-EN IEC 61672:2013, es esperable que aparezcan nuevas recomendaciones para realizar esta corrección, deseablemente sin recurrir a los valores medidos con respuesta *I*.

7.2 Corrección por bajas frecuencias

Para conocer si se tiene presencia de elevado contenido energético en bajas frecuencias, se efectúa el siguiente procedimiento:

1. Se mide el nivel sonoro continuo equivalente con ponderación frecuencial A y C, con respuesta temporal *Fast* ($L_{AFeq,T}$ y $L_{CFeq,T}$).
2. Se calcula la diferencia aritmética ($L_{CFeq} - L_{AFeq}$).
3. Si ($L_{CFeq} - L_{AFeq}$) vale entre 10 dB y 15 dB, la penalización a aplicar será de 3 dB. Esto quiere decir que el valor a informar como equivalente de molestia será (L_{AFeq} + 3) dBA.
4. Si ($L_{CFeq} - L_{AFeq}$) vale 15 dB o más, la penalización a aplicar será de 6 dB. Esto quiere decir que el valor a informar como equivalente de molestia será (L_{AFeq} + 6) dBA.

7.3 Corrección por tonos puros

La determinación de la existencia de tonos audibles que ameriten efectuar correcciones en cuanto a su potencial de generar molestia se realiza en base al siguiente procedimiento:

1. Se mide el nivel sonoro continuo equivalente en bandas de tercio de octava entre 16 Hz y 20.000 Hz con ponderación frecuencial Z y respuesta temporal *Fast* ($L_{ZFeq,i}$).

2. Se identifican las bandas de tercio de octava en las que el nivel de presión sonora $L_{ZFeq,i}$ supera al nivel en sus dos bandas adyacentes (las que se sitúan inmediatamente por encima [$L_{ZFeq,(i+1)}$] y por debajo [$L_{ZFeq,(i-1)}$] de la banda que sobresale).

3. En cada uno de esos casos se calcula la diferencia aritmética entre el nivel en la banda que sobresale y el promedio de sus dos bandas adyacentes:

$$L_{Zdif,i} = L_{ZFeq,i} - 0{,}5 \times [L_{ZFeq,(i-1)} + L_{ZFeq,(i+1)}]$$

4. Las diferencias aritméticas $L_{Zdif,i}$ calculadas se buscan en la tabla 5.1 para determinar el valor de las correcciones aditivas a aplicar para representar la molestia ocasionada por el tono en cuestión. En el caso de que se obtenga más de una corrección con valor distinto de cero, se adicionará únicamente el mayor de tales valores.

Tabla 7-1: Correcciones a aplicar para representar molestia por tonos puros

Frecuencia central de la BTO (Hz)	**Informar L_{AFeq} si:**	**Informar (L_{AFeq}+3) si:**	**Informar (L_{AFeq}+6) si:**
De 20 Hz a 125 Hz	$L_{Zdif,i} < 8$	$8 \leq L_{Zdif,i} \leq 12$	$12 < L_{Zdif,i}$
De 160 Hz a 400 Hz	$L_{Zdif,i} < 5$	$5 \leq L_{Zdif,i} \leq 8$	$8 < L_{Zdif,i}$
De 500 Hz a 20.000 Hz	$L_{Zdif,i} < 3$	$3 \leq L_{Zdif,i} \leq 5$	$5 < L_{Zdif,i}$

8 Modelos predictivos de niveles de presión sonora

Un ***modelo predictivo*** puede entenderse como *una representación de una realidad compleja, que puede responder a un esquema teórico, y que se elabora para estudiar su comportamiento y anunciar o conjeturar lo que en determinadas condiciones ha de suceder*.

Cuando lo que se desea predecir es el nivel de ruido esperable en un lugar en determinadas condiciones y ante la presencia de ciertas fuentes, la complejidad del caso amerita el empleo de modelos también más sofisticados. Es que si bien se trata de un tema largamente estudiado, es muy fácil cometer errores que condicionen la confiabilidad e incluso la potencial utilidad de los resultados que obtengan. Es también muy relevante definir para qué se van a emplear los resultados que se obtengan, puesto que será diferente el nivel de precisión y confiabilidad que se requiere para predecir niveles de ruido a los efectos de la planificación territorial, para evaluar lo adecuado de una modificación en el sistema de tránsito de una ciudad, o para diseñar una solución acústica que ponga fin a un litigio.

A los efectos de la predicción de la emisión y propagación de las ondas sonoras, hay varios aspectos a tener en cuenta. Entre ellos, es de importancia diferenciar entre fuentes fijas o móviles, y fuentes asimilables a emisores puntuales o lineales. A su vez, la direccionalidad de las fuentes, el medio de propagación, la rugosidad de la superficie de éste, los eventuales obstáculos en el camino de propagación, son algunos de los factores a tener en cuenta; algunos de ellos son extremadamente complejos para ser incluidos de un modo simple en modelos predictivos explícitos.

Un modelo predictivo confiable permite obtener buenas aproximaciones de los niveles sonoros que pueden esperarse en determinadas condiciones si se cuenta con los datos correctos para alimentarlo.

Como dice Gaja Díaz (1984), a la hora de desarrollar un modelo predictivo de niveles de presión sonora *"existen dos posibles líneas de acción: o se puede elegir un gran número de parámetros con la esperanza de reducir el error residual, o se puede elegir un grado de precisión desde el principio y minimizar el número de los parámetros."*

Desde el lugar del usuario de estos modelos, es necesario escoger un modelo que pueda ser alimentado con datos correctos y confiables, para que los resultados que se obtengan puedan ser usados con tranquilidad.

8.1 Modelos predictivos de ruido urbano

8.1.1 Aspectos generales

Entre las aplicaciones frecuentes de los modelos predictivos de ruido urbano, puede desearse tomar decisiones acerca del desvío de líneas de tránsito colectivo, el cambio de sentido de circulación en una calle o el mejor lugar para instalar un centro de atención a la salud.

Los modelos predictivos pueden ser de base empírica o teórica. Muchos modelos empíricos se basan en el ajuste de colecciones de datos más o menos amplias, siguiendo alguna forma de ecuación sencilla y aplicando métodos matemáticos conocidos, como el ajuste por mínimos cuadrados. En este tipo de modelos, muchas veces ni la forma de la ecuación ni los coeficientes que resultan suelen tener una interpretación sencilla; deseablemente, cuando se puede elegir entre diferentes opciones, es recomendable privilegiar el uso de modelos que aplican ecuaciones que tienen alguna relación con los fenómenos físicos a que se refieren.

En lo relativo a ruido de tránsito, dado que las bases generales a las que responde el fenómeno de propagación han sido ampliamente estudiadas, los modelos que suelen aplicarse se basan en análisis teóricos que pueden tener diferente complejidad.

Si la fuente emisora que se considera es un vehículo que se desplaza con velocidad uniforme, entonces conociendo el tipo de vehículo, la velocidad a la que circula y la distancia a la que se encuentra el receptor, se puede predecir el nivel sonoro recibido por dicho observador debido a la fuente puntual que se estudia. La forma teórica general de la ecuación que rige el fenómeno es de fácil deducción, aunque luego deberán encontrarse numéricamente los mejores coeficientes para ajustarla a partir de ciertas consideraciones sobre los datos experimentales, siempre procurando que los diferentes términos del modelo tengan un significado físico fácilmente comprensible.

Dentro de los factores que tienen que ver con la emisión de ruido de tránsito, deben considerarse por lo menos el número total de vehículos que circulan y la composición del tráfico, aunque también inciden otros factores como la velocidad de circulación. Esto sin entrar en el detalle de que cada vehículo tiene en sí mismo una diversidad de fuentes de emisión de ruido, algunas de ellas de difícil modelación -como el ruido de rodadura-. En cuanto a la propagación, una de las variables primordiales es la distancia del emisor al receptor, aunque también inciden el ancho de calzada y aceras, el tipo de pavimento, el retiro frontal en ambas aceras, la altura aproximada de edificación a cada lado de la calle, la presencia o no de semáforos o cebras calle arriba y/o calle abajo del punto de medición o la pendiente aproximada de la calzada.

8.1.2 Ecuación simplificada

La forma más simple para la ecuación de predicción, que ha sido largamente empleada es la siguiente:

$$L_{eq} = A + B \log Q$$

siendo Q el tránsito horario total.

En la bibliografía pueden encontrarse múltiples ajustes de los coeficientes A y B, en particular para diferentes ciudades españolas. De Recuero (1997) pueden tomarse los siguientes ajustes para ciudades de la Comunidad Autónoma de Madrid:

$L_{eq} = 50,0 + 6,7 \log Q$	r = 0,80 Pozuelo
$L_{eq} = 56,6 + 4,8 \log Q$	r = 0,74 Majadahonda
$L_{eq} = 41,5 + 9,7 \log Q$	r = 0,94 Móstoles
$L_{eq} = 51,6 + 4,0 \log Q$	r = 0,74 Alcobendas
$L_{eq} = 49,0 + 5,5 \log Q$	r = 0,80 Las Matas
$L_{eq} = 52,1 + 4,6 \log Q$	r = 0,77 Las Rozas
$L_{eq} = 50,0 + 6,7 \log Q$	r = 0,85 Aranjuez
$L_{eq} = 42,6 + 10 \log Q$	r = 0,81 San Lorenzo del Escorial

Y para la Comunidad Autónoma de Madrid en su conjunto:

$L_{eq} = 49 + 7,1 \log Q$	r = 0,90

Barrigón (1999) reseña el siguiente conjunto de ajustes obtenidos para diferentes ciudades:

$L_{eq} = 9,3 \log Q + 44,7$	r = 0,81 Cáceres, 1999
$L_{eq} = 9,8 \log Q + 44,8$	r = 0,83 Gandía, 1984
$L_{eq} = 8,1 \log Q + 45,9$	r = 0,73 Pamplona, 1997
$L_{eq} = 8,0 \log Q + 51,0$	r = 0,98 Santa María (Brasil), 1998
$L_{eq} = 7,8 \log Q + 47,6$	r = 0,85 Valladolid, 1985
$L_{eq} = 9,2 \log Q + 45,6$	r = 0,82 Alcoi, 1992
$L_{eq} = 8,1 \log Q + 48,6$	r = 0,79 Valencia, 1989

A éstos se pueden agregar las ecuaciones que presentan Alamar Penadés y Amando García (1996) para otras ciudades españolas:

$L_{eq} = 7,6 \log Q + 53,5$	r = 0,72 Alcoi, 1983
$Leq = 9,2 \log Q + 45,6$	r = 0,82 Ciudad de Alcoi, 1992
$L_{eq} = 6,8 \log Q + 52,8$	r = 0,70 Valencia, 1980
$L_{eq} = 5,9 \log Q + 49,4$	r = 0,75 Zaragoza, 1988

En este caso la única variable considerada es el tránsito horario total Q, pero aquí la complejidad de la aplicación de este modelo radica justamente en la simplicidad de la ecuación que lo rige, que deja de lado un amplio universo de características que diferencian una situación de otra.

Enfrentado a esta colección de ecuaciones sencillas de idéntica forma y con diferentes coeficientes, el usuario carece en principio de argumentos para escoger un ajuste u otro.

8.1.3 Ecuación general, correcciones

Cuando se trabaja con tránsito clasificado, la ecuación predictiva toma la forma:

$$Leq = A + 10 \times \log(aQ_1 + bQ_2 + cQ_3)$$

Se suelen agregar términos de corrección para reproducir más ajustadamente el valor real:

$$L_{eq} = A + 10 \times \log(aQ_l + bQ_p + cQ_m) + correcciones$$

Los términos aditivos de corrección intentan colaborar a reproducir más ajustadamente el valor real de los niveles sonoros, y en algunos casos pueden responder a fenómenos particulares del lugar de estudio.

En el otro extremo de la complejidad, Jraiw (1986) propone dos ecuaciones para cálculo de niveles sonoros asociados con el tránsito, una en condiciones urbanas y otra en autopistas, a partir de sus trabajos experimentales en la ciudad de Bath (Inglaterra). Sus modelos dependen no sólo de la densidad vehicular total y de su composición, sino también de parámetros como ancho de calle, ha verificado un buen desempeño para nuestras ciudades, sus ecuaciones se presentan a modo indicativo por la diversidad de parámetros que considera y de formas de los términos con que los representa.

Modelo Urbano (Jraiw, 1986):

L_{eq} = 53,2 + 6,00 log V + 11,7 log (L + 6M + 10H) - 4,50 log d - 0,0107 S - 5,23 log (D-1)

Siendo:

V	Velocidad media en km/h	
L	Número de vehículos livianos por hora	} L+M+H = Q
M	Número de vehículos medianos por hora	
H	Número de vehículos pesados por hora	
d	Ancho de la calzada en m	
S	Distancia a un punto singular de la calle (semáforo, rotonda, etc.)	
D	Retiro frontal detrás del sonómetro (m)	

Modelo Suburbano (Jraiw, 1986):

L_{eq} = 56,5 - 6,53 log V + 11,6 log Q + 0,172 P - 6,48 F - 0,0098 S - 2,47 log N

Siendo:

V	Velocidad media en km/h
Q	Tráfico medio total (veh./hora)
P	Porcentaje de vehículos medianos y pesados
F	Distancia entre el punto de medida y la fachada más distante (m)
N	Distancia entre el punto de medida y la fachada más cercana (m)
S	Distancia a un punto singular de la calle (semáforo, rotonda, etc.)

8.1.4 Predicción de niveles de ruido de tráfico en Montevideo

En Montevideo, a partir de la información de campo disponible, se intentó trabajar con varios modelos presentados por la bibliografía, pero los ajustes no resultaron en general satisfactorios.

Se logró determinar que así como para la toma de muestras de ruido en campo se hacía necesario emplear una duración mayor que las que usualmente refiere la literatura, cuando se estudió la predicción de niveles de presión sonora asociados con tránsito en Montevideo, se observó que los modelos predictivos que refiere la bibliografía no daban un buen ajuste. La causa principal era la necesidad de incluir explícitamente en el modelo los "eventos anómalos" (bocinas, motos ruidosas, frenadas violentas, etc.) característicos de la ciudad. Esto implicó la adición de un término de corrección por la ocurrencia de eventos anómalos, cuya forma fue necesario definir. Se propuso entonces como modelo predictivo de niveles sonoros para la ciudad de Montevideo una ecuación que sigue la forma general de los modelos que emplean tránsito clasificado -desglosando en automóviles, motos, ómnibus y camiones- a la que se adicionaba un término representativo del ruido asociado con eventos anómalos, y se le incorporan correcciones por distancia y por velocidad media de circulación. Dado que la ecuación fue desarrollada con datos de 1998-1999, su aplicación en la actualidad puede tener una menor confiabilidad que la que se obtuvo en su desarrollo (más del 90% de los datos dentro de un rango de tolerancia de +/-3 dB en relación al nivel sonoro continuo equivalente medido), para flujos vehiculares de por lo menos 200 vehículos/hora:

$$L_{Aeq,1h} = 49{,}4 + 10 \log(A + 2{,}33\ M + 9{,}01\ O + 6{,}84\ C) + 23{,}266\ Q^{-0{,}3811} - 10 \log d$$

Siendo:

M	N° de motos por hora
A	N° de automóviles livianos por hora
O	N° de ómnibuses por hora
C	N° de camiones por hora
Q	= M + A + O + C
d	Distancia al centro de la calle

Si v > 60 km/h, sumar: 0,15 v - 8,67

8.2 Modelos predictivos de ruido de tránsito en carreteras

Existen muchos modelos que permiten predecir el nivel sonoro continuo equivalente horario en función de las condiciones del tránsito. En nuestro país se aplica frecuentemente el llamado modelo francés, ***"Guide du bruit des transports terrestres"***, que no sólo se aplica en Francia sino también en varios países europeos, entre ellos España.

Este modelo emplea datos sencillos de los que obviamente se debe disponer a la hora de su aplicación, y es válido para tránsito carretero.

Según este modelo:

$$L_{eq} = 20 + 10 \log (Q_{vl} + E\ Q_{vp}) + 20 \log v - 12 \log (d + l_c/3) + 10 \log (\theta/180)$$

Siendo:

L_{eq} Nivel sonoro continuo equivalente en dBA

Q_{vl}, Q_{vp} Número de vehículos ligeros y pesados respectivamente (por hora

E Factor de corrección por equivalencia acústica entre vehículos ligeros y pesados. Para pendientes de la calzada de hasta 3 % tiene valor 7.

V Velocidad del flujo vehicular en km/h

D Distancia al borde de la carretera (m)

l_c Ancho de la carretera (m)

θ Ángulo de visión

8.3 Predicción de niveles sonoros asociados con fuentes fijas: Norma ISO 9613:2

Para predecir los niveles sonoros en el entorno asociados con la operación de fuentes fijas, se suele emplear a nivel internacional la metodología de la Norma ISO 9613 - *Attenuation of sound during propagation outdoors- Part 2: General method of calculation.* Se trata de un método normalizado de cálculo que es el que avala la *Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental* para este tipo de cálculos en los países de la Unión Europea.

8.3.1 Condiciones meteorológicas de aplicación

Las condiciones de aplicación de la Norma consideran que la velocidad del viento debe estar comprendida entre 1 m/s y 5 m/s, medida a una altura de entre 3 m y 11 m sobre el nivel del piso y como promedio en un corto período de tiempo, suficiente para que esas condiciones se puedan considerar representativas.

A su vez, la validez del método de cálculo de la Norma corresponde a condiciones de atmósfera neutra, inestable o inversión térmica moderada con la base a nivel de piso.

8.3.2 Corrección meteorológica para períodos prolongados

Cuando se conocen las características meteorológicas del lugar en que se realiza la evaluación, el nivel $L_{pi,ST}$ se puede corregir para obtener un nivel de presión sonora $L_{pi,LT}$ representativo de un período de tiempo prolongado. Éste se halla como:

$$L_{pi,LT} = L_{pi,ST} - C_{met}$$

Siendo:

$L_{pi,LT}$ Nivel de presión sonora de largo plazo correspondiente a la banda de octava i durante un período de tiempo extenso.

$L_{pi,ST}$: Nivel de presión sonora de corto plazo correspondiente a la banda de octava i.

C_{met}: Corrección por las características meteorológicas medias del lugar (gradientes de temperatura atmosféricos, velocidad del viento, entre otros), pero que a su vez considera las alturas de fuente y receptor, y la distancia existente entre ambos.

8.3.3 Precisión del cálculo

La Norma especifica que el error en el cálculo es de ± 3 dB si la altura promedio entre emisor y receptor no supera los 5 m, pero baja a ± 1 dB si la altura promedio de ellos está entre 5 m y 30

m y la distancia entre ambos no supera los 100 m. Asimismo el error se presenta para distancias entre emisor y receptor que no superan los 1000 m, lo que está no sólo tabulado sino enunciado explícitamente.

8.3.4 Ecuación de predicción

A partir de la emisión acústica de la fuente en bandas de octava normalizadas L_{wi}, se tiene:

$$L_{pi,\,ST} = L_{wi} + D - A_i$$

Siendo:

- $L_{pi,ST}$: Nivel de presión sonora de corto plazo correspondiente a la banda de octava *i*.
- L_{wi}: Nivel de potencia sonora correspondiente a la banda de octava *i*.
- D: Factor de corrección debido a la directividad de la fuente.
- A_i: Atenuación correspondiente a la banda de octava *i*.

El método de cálculo prevé realizar la predicción en bandas de octava normalizadas, si se conoce la emisión de la fuente también en bandas de octava. Considerando que no siempre es posible contar con la información de la emisión sonora en bandas de frecuencia, la Norma indica que cuando la información disponible está dada en escala A la metodología sigue siendo válida si se emplean para el cálculo los procedimientos simplificados, coeficientes y fórmulas correspondientes a la banda de 500 Hz.

Si bien está claramente planteado el procedimiento a seguir para trabajar en escala A, los errores e incertidumbres se van multiplicando, cuanto menos desagregados son los datos de entrada. En el caso en que la fuente tenga una emisión sonora importante en frecuencias bajas, hay mayor riesgo de estar efectuando una predicción menos precisa, ya que las ondas de baja frecuencia sufren menor atenuación.

8.3.5 Directividad de fuentes sonoras

No todas las fuentes que se pueden considerar puntuales son omnidireccionales ni isótropas. Las fuentes reales asimilables a fuentes puntuales suelen ser *direccionales*, o sea que no emiten en todas las direcciones como si fueran fuentes esféricas perfectas y además, tampoco emiten la misma cantidad de energía en todas las direcciones, es decir, son mayoritariamente *anisótropas*. Esto puede tener que ver no sólo con la fuente sino también con las condiciones de propagación.

Para tomar en cuenta esto, se define el ***factor de directividad Q*** como el cociente entre la intensidad de la fuente real en la dirección considerada y la intensidad de una fuente puntual omnidireccional de igual potencia acústica. Puede verse también como la relación entre la energía irradiada en una dirección en las condiciones reales y la que irradiaría una fuente perfectamente omnidireccional. El ***índice de directividad ID*** queda definido en función del ***factor de directividad Q*** como: $ID = 10 \log Q$.

Tabla 8-1: Factores e índices de directividad en casos usuales

Tipo de fuente	Fuente esférica	Fuente semiesférica o propagación en un semiespacio	Propagación en un cuadrante	Propagación en un octante
Factor de Directividad Q	$Q = \frac{4\pi r^2}{4\pi r^2} = 1$	$Q = \frac{4\pi r^2}{4\pi r^2/2} = 2$	$Q = \frac{4\pi r^2}{4\pi r^2/4} = 4$	$Q = \frac{4\pi r^2}{4\pi r^2/8} = 8$
Índice de Directividad ID = 10 log Q	ID = 10 log 1 = **0**	ID = 10 log 2 = **3**	ID = 10 log 4 = **6**	ID = 10 log 8 = **9**

Luego, para obtener el nivel sonoro de una fuente direccional a una distancia *r*, al nivel sonoro esperado si la fuente fuera omnidireccional L_r se le debe sumar el índice de directividad *ID*:

$$L_{p,r} = L_p + ID = L_p + 10\log(Q)$$

8.3.6 Atenuación del nivel de presión sonora

La atenuación A_i correspondiente a la banda de octava *i* que utiliza en el cálculo la Norma ISO 9613 considera no sólo la divergencia geométrica sino también por factores diversos que incluyen absorción atmosférica, la atenuación debido a las características del suelo o a la existencia de apantallamientos, obstáculos y cortinas vegetales en la dirección de propagación considerada, que es la del viento en el momento de la simulación. También permite considerar posibles reflexiones del sonido durante su propagación y otros efectos misceláneos.

La atenuación A se calcula como sigue:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{barr} + A_{fol} + A_{site} + A_{hous}$$

siendo:

A_{div}: Divergencia geométrica, en dB
A_{atm}: Absorción atmosférica, en dB/octava
A_{gr}: Efecto del terreno, en dB/octava
A_{barr}: Atenuación debida a la presencia de barreras, en dB/octava
A_{fol}: Atenuación debida a la vegetación, en dB/octava
A_{site}: Atenuación debida a la presencia de emplazamientos industriales, en dB/octava
A_{hous}: Atenuación debida a la presencia de edificaciones, en dB/octava.

Para cada uno de los términos de atenuación, la Norma da un método de cálculo explícito y autocontenido, que permite su aplicación sin más información que la que deriva del conocimiento de las características de la fuente emisora y del terreno –y distancia- que la separa del punto en que interesa efectuar la evaluación.

Como grandes comentarios en relación a los términos de atenuación, cabe señalar:

- La ley de decaimiento que considera la Norma es cuadrática.
- La absorción atmosférica se expresa en dB/km en cada banda de octava, y depende de la temperatura y de la humedad relativa ambiente. Los niveles de atenuación que se logran sólo son significativos en las altas frecuencias y a grandes distancias de la fuente. Las bajas frecuencias no sufren absorción significativa por parte de la atmósfera.

- La absorción por parte del suelo se relaciona principalmente con su porosidad y con el tipo de cobertura que posee en el tramo que separa emisor y receptor. El método de cálculo que propone la Norma para determinar la absorción del terreno sólo es válido cuando el terreno es relativamente plano, ya sea horizontal o con una pendiente continua.

9 Algunas medidas aplicables al control de ruido ambiental

El ***control de ruido*** se refiere al conjunto de técnicas y tecnologías que permite obtener niveles de ruido ambiental aceptables en cierto lugar, de acuerdo con consideraciones económicas y operativas.

El *control de ruido* no necesariamente implica *reducción de niveles de emisión*: se refiere a hacer aceptable la inmisión (la señal que llega al receptor), y la aceptabilidad implica diferentes atributos, como nivel de presión sonora, composición espectral, inteligibilidad, etc.

Como en la mayor parte de los problemas ambientales, las posibles medidas deben analizarse procurando primero mejorar el desempeño de la fuente, es decir, reducir las emisiones; luego se abordarán las posibilidades de actuación sobre el medio de propagación; y recién por último se considerará la necesidad de tomar medidas de protección en el receptor potencialmente afectado.

9.1 Acondicionamiento acústico

El acondicionamiento acústico de locales implica la aplicación criteriosa de varios elementos, de los que los principales son la absorción y el aislamiento acústico:

- La ***absorción acústica***, que se refiere a la propiedad que poseen materiales, estructuras y objetos de convertir el sonido en otra forma de energía (mecánica, térmica, de deformación) cuando el sonido incide sobre su superficie. El coeficiente de absorción acústica **α** de una superficie se define como el cociente entre la energía acústica absorbida e incidente y varía para cada banda de frecuencia.

- El ***aislamiento acústico***, que se refiere a la capacidad de un material para impedir que las ondas sonoras se propaguen a través de él. El coeficiente de transmisión acústica **τ** de un material se define como el cociente entre la energía acústica trasmitida e incidente y también varía con la frecuencia. A los efectos prácticos, se trabaja con el índice de reducción acústica, que se puede expresar como:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

Por lo general los materiales que tienen un buen desempeño como absorbentes acústicos son malos aislantes y viceversa.

9.2 Barreras Acústicas

Las barreras acústicas o pantallas poseen la característica de “bloquear” la energía sonora proveniente de una fuente de ruido, creando una zona llamada “sombra acústica” que permite crear espacios relativamente tranquilos y silenciosos.

Las aplicaciones más frecuentes se concentran en el entorno de carreteras, obras de construcción y actividades extractivas, en las cercanías de vías férreas, aeropuertos y sectores industriales.

En el diseño de pantallas acústicas se deben tener en cuenta, además del aislamiento y la absorción de los materiales, los fenómenos de difracción de las ondas sonoras. Uno de los métodos de cálculo más generalizados es el de Maekawa, válido entre 100 Hz y 5.000 Hz. En ese intervalo, la atenuación A se calcula como:

$$A = 10 \log (20\ N)$$

Siendo N el Número de Fresnel, que se calcula en función de la longitud de onda λ y la diferencia entre los caminos directo (d) y difractado (a + b):

$$N = \frac{2}{\lambda}\ (a + b\ - d) = \frac{2\delta}{\lambda}$$

Bibliografía básica

1. Boletín Oficial del Estado Español, Real Decreto 1513/2005, BOE Nº301, pp. 41356-41363.
2. Boletín del Estado Español. BOE núm. 254, martes 23 de octubre de 2007. Real Decreto 1367/2007 por el que se desarrolla la Ley 37/2003, del Ruido, pp. 42952-42973. España, 2007.
3. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002. 14 pp.
4. Gaja Díaz, Esteban. Ingeniería Acústica Ambiental. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, 251 pp. 1996.
5. Giménez de Paz, Juan Cruz. Ruido: para los posgrados en higiene y seguridad industrial. Editorial Nobuko. 176 pp. 2007.
6. González, A.E.; Indarte Bonifacino, E.; Lisboa, M.R. Acústica Urbana Módulo II, Convenio MVOTMA-UdelaR, 119 pp. 2008. ISBN: 978-9974-7610-3-2
7. Harris, Cyril M. Manual de Medidas Acústicas y Control del Ruido (Volúmenes I y II). Tercera Edición, McGraw-Hill, 1995.
8. Miyara, Federico. Control de Ruido. Ed. propia. 1999.