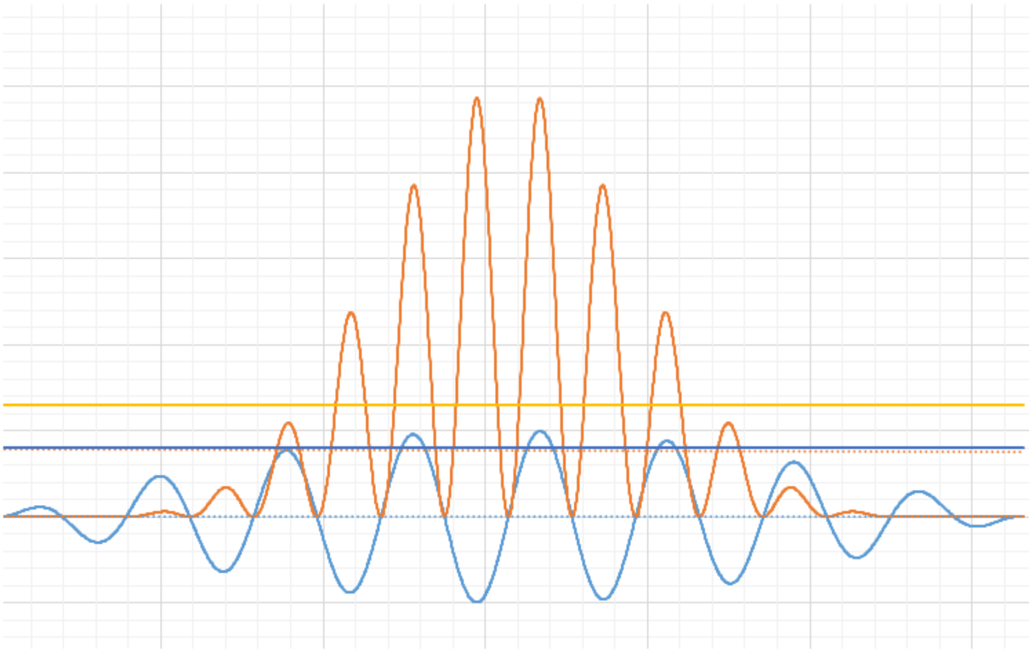
ACÚSTICA AMBIENTAL

Cuaderno I

Conceptos Introductorios



2017

MVOTMA

Ministra de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente
Arq. Eneida de León

Director Nacional de Medio Ambiente
Ing. Qco. Alejandro Nario

Contraparte Técnica
Ing. Qca. Magdalena Hill

Universidad de la República

Rector
Dr. Roberto Markarian

Decana de Facultad de Ingeniería
Ing. María Simon

Este material ha sido preparado en el marco del convenio DINAMA-IMFIA DIA bajo la responsabilidad de

Dra. Ing. Alice Elizabeth González

González, Alice Elizabeth

Acústica Ambiental. Conceptos Introductorios. Cuaderno 1

Montevideo, UdelaR – FI – IMFIA, 2017

ISBN: 978-9974-0-1533-3 Obra completa

ISBN: 978-9974-0-1535-7 Cuaderno 1

APUNTES SOBRE CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

CUADERNO 1: CONCEPTOS INTRODUCTORIOS

CONTENIDOS

1 El sonido y algunas de sus características

1.1 ¿Qué es el sonido?

Físicamente, 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. El caso de mayor interés en estos Cuadernos será la propagación del sonido por vía aérea.

Cabe recordar que una onda consiste en la propagación de una perturbación de alguna propiedad de un medio a través de éste, de modo que ocurre transporte de energía pero no de materia. La magnitud de la propiedad que se propaga en el medio puede escribirse como una función de la posición y del tiempo. En el caso del sonido, la propiedad que se modifica es la presión del medio que, en consecuencia, genera a su vez modificaciones en otras propiedades como por ejemplo, la densidad.

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 la zona perturbada 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 en términos de 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.

1.2 Sobre la frecuencia

1.2.1 Frecuencia y período

La ***frecuencia*** *(f)* es la cantidad de veces que se repite un evento en un cierto tiempo. En el caso de una onda sonora, es el número de veces que se repite (pasa) una cresta en idénticas condiciones en una unidad de tiempo (las crestas identifican a la máxima amplitud de las perturbaciones de la presión en relación a la presión de equilibrio) o, dicho de otro modo, el número de pulsos o ciclos de presión que se producen por unidad de tiempo. La frecuencia tiene dimensiones de s^{-1} y su unidad de medida es el Hertz (Hz), siendo 1 Hz = 1 s^{-1} (o 1 ciclo por segundo, 1 cps; o 1/60 ciclos o revoluciones por minuto, 1/60 rpm).

El ***período*** (*T)* es el tiempo que media entre dos repeticiones sucesivas de un evento; es el inverso de la frecuencia (T = 1/f) y se mide en unidades de tiempo (segundo, s).

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*. 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.

1.2.2 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 $c \times T$, 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 es del orden de 340 m/s (ver Tabla 1-1).

Tabla 1-1: Velocidad del sonido para ondas planas en varios medios (en base a fuentes diversas)

Medio	Velocidad del sonido c [m/s]	Densidad del medio (kg/m^3)
Aire a 0 ºC	332	1,205
Aire a 20 ºC	344	1,29
Dióxido de carbono	260	1,97
Hidrógeno	1294	0,09
Vapor a 100ºC	405	0,59
Agua a 20ºC	1482	998
Alcohol etílico a 20ºC	1170	790
Acero	5200	7800
Aluminio	5000	2700
Bronce	3480	8700
Plomo	1190	11300
Madera	4000	700
Mármol	3810	2800
Granito	3950	2800
Hormigón	3500	2600
Corcho	500	250
Vidrio	5000	2500

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

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

Una aplicación directa de esta fórmula permite obtener la longitud de onda correspondiente a distintas frecuencias. Si el medio de propagación es aire a 20 °C, la longitud de onda de un sonido de 1000 Hz resulta ser de 0,34 m, en tanto la de un sonido de 100 Hz será de 3,44 m. Las longitudes de onda que corresponden a las frecuencias extremas del tango audible son de 0,017 m para 20.000 Hz y 17,2 m para 20 Hz.

1.2.3 Sonidos periódicos y tonos puros

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***, ya 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***, que es la propiedad que permite diferenciar sonidos de igual frecuencia e intensidad cuando provienen de diferentes fuentes. En la **Figura 1-1** se muestra el gráfico de evolución del nivel de presión sonora que resulta al tocar un “la” de frecuencia 440 Hz en dos instrumentos de viento diferentes: un clarinete y un saxofón.

1.2.4 Composición espectral de los sonidos

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

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*.

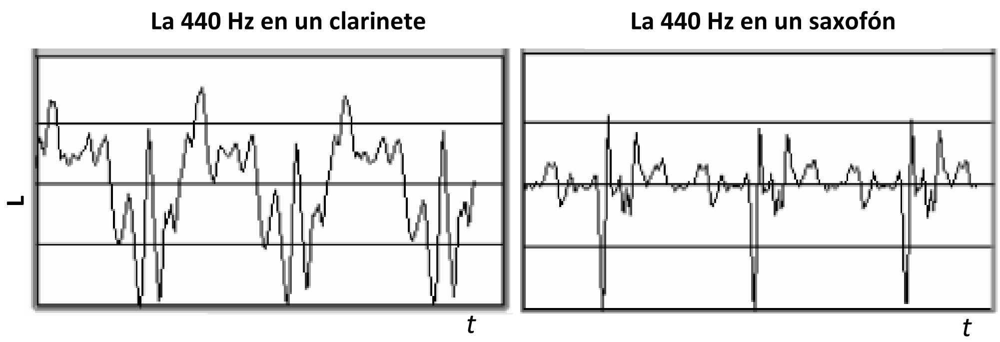


Figura 1-1: Gráfico L(t) de un sonido de 440 Hz emitido por un clarinete (izq.) y un saxofón (der.) (tomado de Jordà Puig, 1997) Nótese que, aun tratándose de sonidos de la misma frecuencia, la forma de la onda y la evolución de la intensidad sonora en el tiempo tienen comportamientos diferentes

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 conjunto de sonidos comprendidos entre dos notas iguales sucesivas, 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 que habitualmente se emplean y en las que trabajan los analizadores de espectro están estandarizadas según normas internacionales. En la siguiente sección se presentan algunos ejemplos.

¿Cuáles son las frecuencias de los sonidos que distan una octava de un sonido de 500 Hz?

Octava superior: 2 f =2 x 500 = 1000 Hz

Octava inferior: f/2 = 500 / 2 = 250 Hz

En la **Tabla 1-2** se listan las frecuencias centrales de las bandas normalizadas según Norma UNE-EN 61260-1:2014, tanto para octavas (valores en líneas grises) como para tercios de octava (valores en líneas blancas).

A su vez, las frecuencias centrales de cada banda 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, si en una BO se tiene por definición que:

$$f_2 = 2\, f_1$$

Resultará entonces:

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

Tabla 1-2: Frecuencias centrales normalizadas para bandas de octava y tercios de octava (en Hz) según Norma UNE-EN 61260-1:2014

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

Algunos ejemplos

1 *¿Cuáles son las frecuencias de los sonidos que distan una octava de un sonido de 500 Hz?*

Octava superior: 2 f = 2 x 500 = 1000 Hz

Octava inferior: f/2 = 500 / 2 = 250 Hz

2 *¿Cuáles son las frecuencias de los tres primeros armónicos de un sonido de 500 Hz?*

Los armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental: 500 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz.

3 *¿Cuál es la frecuencia central de la banda de octava comprendida entre 500 Hz y 1000 Hz?*

La frecuencia central es el promedio geométrico de las frecuencias extremas.

$(f_1.f_2)^{½} = (500 \times 1000)^{½} = 707$ Hz

4 *¿Cuáles son las frecuencias extremas de la banda de octava centrada en 4000 Hz?*

La frecuencia central es el promedio geométrico de las frecuencias extremas. Con un razonamiento inverso al anterior:

$4000 \text{ Hz} = (f_1.f_2)^{½} = (f_1.2f_1)^{½} = 2^{½} f_1$

$f_1 = 4000 / 2^{½} = 2828$ Hz

$f_2 = 2 f_1 = 5656$ Hz

5 *¿Cuáles son las frecuencias extremas de la banda de tercio de octava centrada en 4000 Hz?*

Con un razonamiento análogo al anterior:

$4000 \text{ Hz} = (f_1.f_2)^{½} = (f_1.2^{1/3}f_1)^{½} = 2^{1/6} f_1$

$f_1 = 4000 / 2^{1/6} = 3564$ Hz

$f_2 = 2^{1/6} \times f_c = 4490$ Hz

6 *¿Cuáles son las frecuencias extremas de la banda de tercio de octava centrada en 5000 Hz?*

Con un razonamiento análogo al anterior:

$5000 \text{ Hz} = (f_1.f_2)^{½} = (f_1.2^{1/3}f_1)^{½} = 2^{1/6} f_1$

$f_1 = 5000 / 2^{1/6} = 4454$ Hz

$f_2 = 2^{1/6} \times f_c = 5612$ Hz

Como resulta de los ejemplos 4, 5 y 6, algunos valores de corte que deberían coincidir resultan numéricamente diferentes. Así, la frecuencia superior de la BTO de 4000 Hz debe ser la frecuencia inferior de la de 5000 Hz y la frecuencia superior de la BTO de 5000 Hz debería coincidir con la de la BO de 4000 Hz. Por ello, también las frecuencias de corte están normalizadas, pese a que se pueden calcular fácilmente. En la Tabla 1-3 se presentan entonces las frecuencias extremas de cada BO y BTO dentro del rango audible.

Tabla 1-3. Frecuencias extremas de las bandas de octava y tercios de octava, en Hz (a partir de Giménez de Paz, 2007)

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

1.3 Sobre la velocidad del sonido

La propagación de una onda de presión no significa que se transporten moléculas de aire avanzando con la onda, sino que cada partícula es desplazada longitudinalmente de su posición de equilibrio, ejerciendo una fuerza sobre la partícula que está al lado y ocasionándole el mismo efecto. En otras palabras, no existe propagación de materia, como sucede en cambio en una ráfaga de viento o en el flujo de aire a través de una tubería de ventilación.

Por lo tanto 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.

1.3.1 Impedancia acústica del medio

Cuando la perturbación (la onda sonora) pasa por un punto, las partículas experimentan un pequeño desplazamiento respecto a su posición de equilibrio. Al terminar el pasaje de la perturbación, cada partícula vuelve a su posición 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 inicial 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:

$$p = u \times \rho_o \times c$$

siendo:

ρ_o = densidad del aire en kg/m^3 (a 20 ºC es de 1,2 kg/m^3)
c = velocidad de propagación del sonido en m/s (en aire a 20 ºC, es de 344 m/s)
u = velocidad de la partícula en m/s

Escribiendo esta relación de otro modo:

$$\frac{p}{u} = \rho_o \cdot c$$

O bien:

$p = Z \cdot u$, siendo $Z = \rho_o c$

El cociente ***p/u*** se denomina ***impedancia acústica específica*** del medio y se suele representar con la letra ***Z***. Su unidad es el Rayl, siendo 1 Rayl = 1 Pa.s/m.

1.3.2 Velocidad de las partículas

La velocidad de cada partícula al momento del pasaje de la onda se puede calcular si se conoce la presión sonora y el valor de Z, considerando que p = Z u.

La velocidad de las partículas del medio en una conversación normal (presión ≈ 0,020 Pa), suponiendo una temperatura del aire de unos 20 ºC, resulta ser:

$$u = \frac{p}{Z} = \frac{0{,}020}{1{,}2 \times 344} = 4{,}8 \times 10^{-5}\ m/s$$

Aún si se tratara de una violenta discusión (presión ≈ 0,280 Pa), la velocidad de las partículas sería de todos modos muy pequeña:

$$u = \frac{p}{Z} = \frac{0{,}280}{1{,}2 \times 344} = 6{,}8 \times 10^{-4}\ m/s$$

1.3.3 Velocidad de propagación 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*** -que se designa como ***velocidad del sonido-***, 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 de movimiento de las partículas con respecto a su posición de equilibrio, lo que surge claramente de los ejemplos anteriores.

La velocidad del sonido c en un gas depende de su peso molecular y de su temperatura; para un mismo gas crece a mayor temperatura y, a igual temperatura, decrece para gases más pesados:

$$c=\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Donde:

- γ constante adiabática del gas (para el aire, 1,4)
- R constante universal de los gases = 8,314 J/mol K
- T temperatura absoluta en K
- M peso molecular del gas, en kg/mol (para el aire, 28,95 x 10^{-3} kg/mol)

Para temperaturas cercanas a la temperatura ambiente (t = 20ºC), la velocidad de propagación el sonido en el aire es de *c* = 344 m/s. A su vez, varía con la temperatura siguiendo aproximadamente la siguiente relación[1]:

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

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 1-1 se indica la velocidad aproximada del sonido en varios medios, suponiendo ondas planas.

Ejemplos

7 *¿Cuál es la velocidad de las partículas en una conversación cuya presión sonora es de aproximadamente 0,020 Pa?*

u = p/Z = 0,020/413 = 4,8 x 10^{-5} m/s = 0,048 mm/s

8 *¿Y si la presión sonora fuera de 1 Pa?*

u = p/Z = 1/413 = 0,0024 m/s = 2,4 mm/s

[1] Esa relación resulta de efectuar un desarrollo de $(1 + t/T_0)^{1/2}$ y tomar los primeros términos.

9

Un sonido que se produce en cierto punto se registra en otro lugar 4 segundos después. ¿A qué distancia se encuentra el segundo punto, si se considera propagación por vía aérea y la temperatura del aire es de 18 ºC?

La velocidad del sonido en el aire a 18 ºC se calcula como:

$v_s = 331,4 + 0,606 \times 18 = 342,3$ m/s

La distancia recorrida por vía aérea en 4 segundos es: $d = v \times \Delta t = 342,3 \times 4 = 1369$ m

10

Si ocurriera también propagación por vía sólida, ¿con qué desfasaje llegarían las ondas por vía aérea y por vía sólida, si el medio de propagación fuera roca granítica?

Tiempo de viaje de la onda en granito: $\Delta t = d / v = 1369/3950 = 0,35$ s (Obsérvese que la onda que viaja por vía sólida llega en forma casi instantánea, por lo menos para el oído humano).

Luego, el desfasaje resulta ser de 4 - 0,35 = 3,65 s.

11

¿Con qué antelación percibe un sensor acústico subacuático la aproximación de un barco que navega a 25 km/h?

Velocidad del barco = 6,9 m/s

Velocidad del sonido = 1482 m/s

El sonido llega 1475 s antes, es decir, con casi 25 minutos de antelación.

1.4 Sobre la presión

1.4.1 Presión sonora

Se define como **presión** a la fuerza aplicada por unidad de superficie; por lo tanto, tiene dimensiones de fuerza sobre área. En el Sistema Internacional (S.I.) de unidades de medida, la unidad de presión es el pascal (Pa), que se corresponde con el newton (N) como unidad de fuerza (1 N = 1 kg·m/s^2 = 0,102 kgf) y el m^2 como unidad de área: 1 Pa = 1 N/m^2.

Se designa como ***presión atmosférica*** a la presión que ejerce la columna de aire atmosférico (básicamente los primeros 15 km de atmósfera) debido a su propio peso sobre cualquier punto de la superficie terrestre. Se la considera la *presión de equilibrio* de la atmósfera.

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:

$p_{atm} = 1 \times 10^5$ Pa

la presión incremental correspondiente a sonidos audibles -sin llegar a provocar dolor[2]- varía en el intervalo de:

20×10^{-6} Pa $\leq$ p ≤ 200 Pa

En la Tabla 1-4 se dan los valores de la presión para algunos sonidos típicos. Por ejemplo, para una conversación normal, la presión incremental es del orden de 0,02 Pa.

Tabla 1-4. Presión eficaz sonora y nivel de presión sonora para ambientes acústicos típicos y algunas fuentes sonoras (basado en F. Miyara, 1999)

FUENTE	p_{ef} [Pa]	L_p [dB]
Umbral del dolor	200	140
Despegue de avión a reacción	20	120
Discoteca a todo volumen	6,3	110
Martillo neumático a 2 m	3,6	105
Ambiente industrial ruidoso	0,63	90
Piano a 1 m con fuerza media	0,20	80
Automóvil silencioso a 2 m	0,063	70
Conversación normal	0,020	60
Ruido urbano de noche	0,0063	50
Habitación interior (día)	0,0020	40
Habitación interior (noche)	0,00063	30
Estudio de grabación	0,00020	20
Cámara sonoamortiguada	0,000063	10
Umbral de la audición a 1 kHz	0,000020	0

1.4.2 Presión eficaz

En un fenómeno que ocurre en forma periódica se debe diferenciar el valor medio del valor eficaz. El ***valor medio*** es la media aritmética de los valores instantáneos que toma la función periódica durante un período T completo, y en ondas sinusoidales tiene valor nulo.

Por eso resulta más conveniente recurrir al ***valor eficaz***. El ***valor eficaz*** es la media cuadrática de los valores instantáneos durante un período T completo y se interpreta como la magnitud de la señal continua que produce en un ciclo el mismo efecto que la señal original que varía en el tiempo (ver Figura 1-2).

Si la señal es variable, se define el ***valor cuadrático medio*** de la presión sonora $p = p(t)$ como:

---

[2] Para algunos autores, la máxima presión que tolera el oído humano sin sentir dolor es de 20 Pa, que corresponde a 120 dB. Dado que los niveles de presión sonora que se pueden medir en espectáculos tales como recitales de música en vivo superan ampliamente ese valor, buena parte de la comunidad científica se ha volcado a asumir el umbral del dolor en los 140 dB, es decir, en 200 Pa.

$$\frac{1}{T}\int_T p^2(t)$$

y entonces la ***presión sonora eficaz*** resulta ser:

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

Los instrumentos de medición usualmente consideran valores eficaces. Así, en términos de presión eficaz p_{ef}, la intensidad acústica media en un cierto intervalo de tiempo se puede escribir como:

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

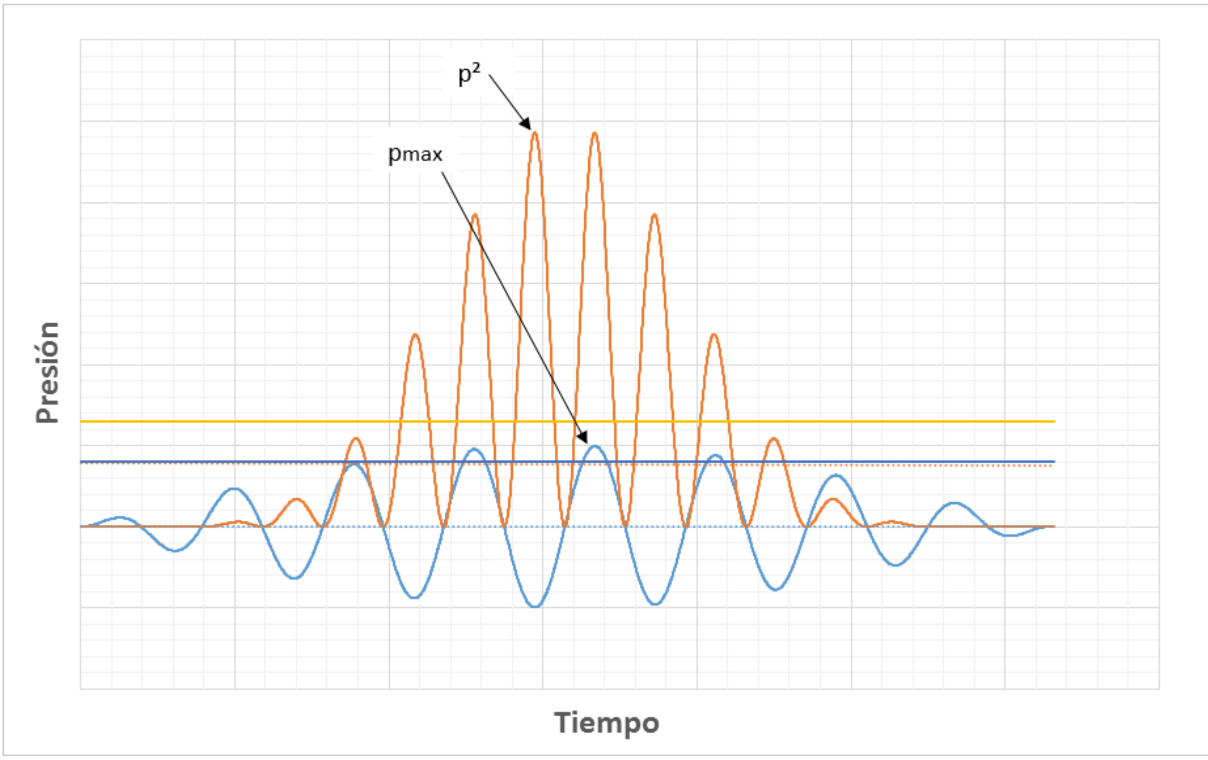


Figura 1-2. Representación de la presión eficaz: en el gráfico se observa p(t) (celeste); $p^2(t)$ (naranja); media de $p^2(t)$ (amarillo) y raíz cuadrada de la media de $p^2(t)$ (azul).

1.5 Sobre la intensidad

1.5.1 Energía de una onda sonora

La ***energía***, en cuanto capacidad para producir cambios, es uno de los conceptos centrales de la física, debido a que es una propiedad común a todos los sistemas físicos (mecánicos, electromagnéticos, termodinámicos, químicos, etc.). Puede existir en numerosas formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, química y nuclear; y su suma constituye la energía total de un sistema. En el análisis termodinámico se consideran las diversas formas de energía de un sistema en dos grupos: macroscópicas y microscópicas. Dentro del grupo de las energías microscópicas se consideran aquellas que se relacionan con la estructura molecular de un sistema y el grado de actividad molecular.

A la suma de todas las formas de energía microscópicas se la denomina *energía interna*. Dentro del grupo de las energías macroscópicas se consideran las que un sistema posee como un todo en relación a cierto marco de referencia exterior (energía cinética y potencial). Se relaciona con el movimiento y la influencia de factores externos como gravedad, magnetismo, electricidad, tensión superficial. En los sistemas acústicos, la energía puede descomponerse en energía potencial y energía cinética.

Una de las leyes fundamentales de la naturaleza es el *principio de conservación de la energía*, que establece que durante una interacción la energía puede cambiar de una forma a otra y/o transferirse entre sistemas vinculados, pero la cantidad total de energía permanece constante; es decir, *la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma*.

Como la energía asociada con una onda sonora se relaciona con la presión, resulta que la energía se va propagando junto con la perturbación. Como la presión es diferente de cero sólo en los puntos por los que está pasando la perturbación, en esos puntos se tiene también un valor de energía acústica no nulo. En ondas planas la energía es proporcional al cuadrado de la presión, lo que significa que si se aumenta la presión 3 veces, la energía aumenta $3^2 = 9$ veces.

1.5.2 Potencia acústica

La ***potencia*** es la cantidad de energía por unidad de tiempo. Se mide en joules sobre segundo (watt), siendo 1 W = 1 J/s:

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

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

1.5.3 Intensidad acústica

Se denomina ***intensidad*** al flujo de energía a través de una superficie por unidad de tiempo. Como la cantidad de energía por unidad de tiempo es la *potencia*, entonces la intensidad también puede entenderse como potencia por unidad de área. En el Sistema Internacional (SI), la unidad de medida de la intensidad es el W/m^2.

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

Se define la ***intensidad acústica I*** como el *flujo de energía acústica* que atraviesa una superficie por unidad de tiempo. 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. En términos de presión eficaz p_{ef}, la intensidad media se expresa como:

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

La intensidad es proporcional al cuadrado de la presión sonora, por lo que la energía y la potencia acústica también lo son:

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

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

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 1 x 10^{-12} W/m^2 a 1x10^2 W/m^2.

Ejemplos

12 *Una fuente puntual de potencia acústica 5 W emite en forma omnidireccional. ¿Qué intensidad se tiene a 10 m de la fuente? ¿Qué presión se tiene en ese punto?*

I = W / S = 5 / (4 π r^2) = 5 / (4 π x 100) = 4 x 10^{-3} W/m^2

I = p^2 / ρ c

ρ = 1,2 kg / m^3

c = 344 m/s a 20 ºC

p^2 = I ρ c = 4 x 10^{-3} x 1,2 x 344 = 1,65 Pa^2 y p = 1,28 Pa

13 *Una fuente sonora lineal de 2,5 W/m de potencia acústica provoca una presión sonora de 0,5 Pa en un cierto punto. Suponiendo que el medio de propagación es aire a 20 °C y que la fuente emite en forma isótropa (es decir, que emite en forma homogénea en todas las direcciones) ¿a qué distancia se encuentra ese receptor?*

La intensidad en el punto considerado vale:

I = p^2/ ρ c = 0,606 mW/m^2 = W/S

S = 2,5 / (0,606 x 10^{-3})= 4125 m^2

S = 2 π d x 1 m = 4125 m^2

Luego d = 657 m

2 Niveles de presión sonora

2.1 Nivel de una magnitud

Un ***nivel*** se define como el logaritmo decimal del cociente entre dos valores de una misma magnitud, de los cuales el que se toma como denominador es un valor de referencia que debe elegirse en función de la magnitud en cuestión.

$$L = \log_{10} \frac{A}{A_0}$$

La unidad de la escala de niveles es el *bel*, que corresponde a una relación de 10 veces entre el numerador y el denominador de la expresión. Para lograr un rango más amplio dentro de la misma escala se emplea el *decibel* (dB), que es la décima parte del bel.

Cualquier magnitud admite ser expresada como un nivel. Sin embargo, algunas son más adecuadas que otras para usarlas bajo la forma de nivel. En particular, lo que tiene que ver con los sentidos suele estar asociado con la ley de Weber-Fechner, que se refiere a que la sensación se relaciona con el logaritmo de la intensidad del estímulo y no directamente con éste. Dicho de otro modo, para duplicar la sensación es necesario que el estímulo sea 10 veces más intenso.

Es interesante notar que un incremento de 1 bel no implica la misma variación en todos los casos. Por ejemplo:

$$L_1 = \log_{10} \frac{100\,A_0}{A_o} = 2\,Bel$$

$$L_2 = \log_{10} \frac{1000\,A_0}{A_o} = 3\,Bel$$

$$L_3 = \log_{10} \frac{10000\,A_0}{A_o} = 4\,Bel$$

Luego, una diferencia de 1 Bel:

$$L_2 - L_1 = \log_{10}\left(\frac{1000\,A_0}{A_o} \cdot \frac{A_0}{100\,A_0}\right) = 1\,Bel$$

$$L_3 - L_2 = \log_{10}\left(\frac{10000\,A_0}{A_o} \cdot \frac{A_0}{1000\,A_0}\right) = 1\,Bel$$

Sin embargo, en el primer caso el incremento de 1 Bel representa un pasaje de 100 A_0 a 1.000 A_0 (900 A_0) pero en el segundo, se trata de un pasaje de 1.000 A_0 a 10.000 A_0 (9.000 A_0).

2.2 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, $p_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa (es la mínima presión que estadísticamente es necesaria para generar sensación auditiva a 1000 Hz en oídos sanos de 18 años de edad).El empleo de esta escala tiene que ver a su vez con la respuesta del oído humano ante el estímulo sonoro que, sobre todo para frecuencias inferiores a 1000 Hz, puede asumirse como de tipo logarítmico.

Se define 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, expresado en dB, también se puede escribir como[(3)]:

$$L_p = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 = 10 \cdot \log\left(\frac{p}{20 \times 10^{-6}}\right)^2 = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{20 \times 10^{-6}}\right)$$

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

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

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 promedialmente 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 20×10^{-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[(4)] *(umbral del dolor)*.

---

(3) Por propiedades de los logaritmos $\log x^y = y \log x$

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.

En la Tabla 1-4 se dan valores usuales de presión sonora (*p*) y de nivel de presión sonora (L_p) para algunos sonidos habituales. Por ejemplo, para una conversación normal, la presión sonora es del orden de 0,020 Pa y su nivel de presión sonora, de 70 dB.

2.3 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., ineludiblemente 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:

$$L_I = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

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:

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

Ahora bien, si la fuente emisora admite ser representada como fuente puntual e isótropa, la potencia acústica se distribuirá homogéneamente en superficies esferas concéntricas:

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

Si, en cambio, la fuente emisora se asemejara a una fuente lineal de longitud infinita, en cada tramo de longitud l se tendrá un flujo en superficies cilíndricas con el eje en la fuente:

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

Del mismo modo se puede obtener la relación entre el nivel de potencia acústica de la fuente y el nivel de presión sonora en una superficie de pasaje.

---

(4) En concordancia con la nota al pie (1), para aquellos autores que sitúan la máxima presión tolerable por el oído humano en 20 Pa, el umbral del dolor es de 120 dB.

2.4 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 lo que se debe cuantificar es la intensidad acústica en ese punto debido al aporte de dos o más fuentes, es decir, conocer 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).

A la fuente 1 se le asigna una intensidad acústica I_1 tal que:

$$I_1 = \frac{p_1^2}{\rho_0 c}$$

Y de modo similar a la fuente 2 le corresponderá I_2:

$$I_2 = \frac{p_2^2}{\rho_o c}$$

La energía acústica I_T en el punto en cuestión resulta de la suma de la energía que aporta cada una de las fuentes:

$$I_T = \frac{p_T^2}{\rho_o c}$$

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:

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

lo que ratifica que NO es $L_1 + L_2$.

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

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

Ejemplo de aplicación

14 *Dos fuentes generan en un mismo punto niveles de 73 dB y 68 dB respectivamente cuando cada una de ellas funciona por separado. Calcular el nivel que se mide en ese mismo punto cuando ambas fuentes funcionan a la vez.*

Se debe sumar L1= 73 dB y L_2 = 68 dB

1. L_1 / 10= 7,3 L_2 / 10= 6,8

10 $^{L1/10}$= 19952623,15 10$^{L2/10}$= 6309573,44

2. L_T = 10 x log (19952623,15 + 6309573,44) = 74,2 dB

O sea: 73 dB + 68 dB = 74,2 dB

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 2-1 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).

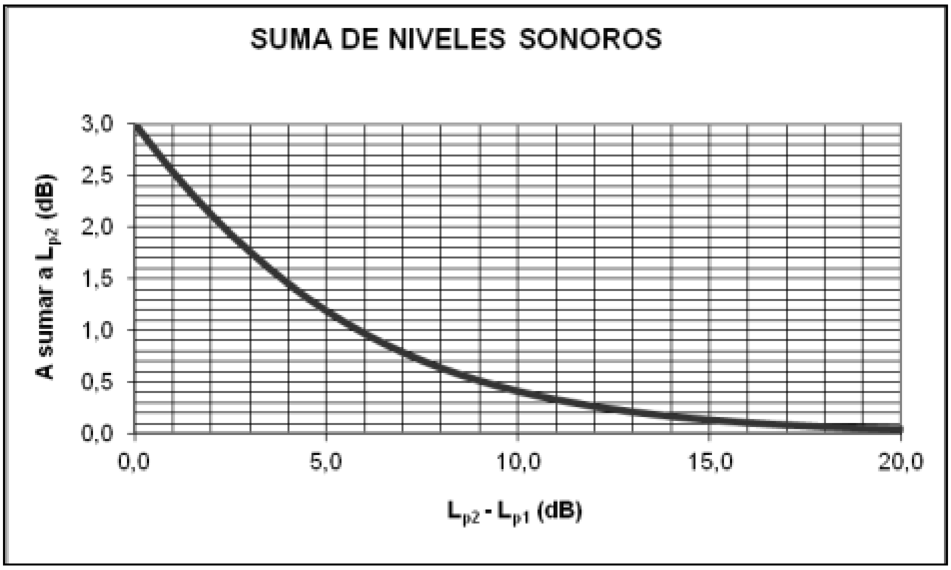


Figura 2-1. Ábaco para suma de niveles sonoros

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 aritméticamente 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.

En el ejemplo propuesto:

1. (L_2 - L_1) = 73 dB – 68 dB = 5 dB

2. Entrando por abscisas con el valor 5, se obtiene el valor 1,2 en ordenadas que es el que debe sumarse al mayor de los dos niveles dados.

3. El nivel suma resulta de sumar 1,2 al nivel más alto de los niveles dados:

   L_T = 73 + 1,2 = 74,2 dB

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:

$$L_T = 10\log\left[10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}}\right] = 10\log\left(2\times10^{\frac{L_1}{10}}\right) = 10\ \log(2) + 10\log\left(10^{\frac{L_1}{10}}\right) \cong 3 + L_1$$

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 2-1.

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.

2.5 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:

$$L_{I2} = 10\log\left[\frac{p_T^2 - p_1^2}{p_o^2}\right] = L_{p2}$$

$$L_{p_2} = 10 \times \log\left[10^{\frac{Lp_T}{10}} - 10^{\frac{Lp_1}{10}}\right] = 10 \times \log\left[10^{\frac{L_T}{10}} - 10^{\frac{L_1}{10}}\right]$$

Ejemplo de aplicación

15

En un local se mide un nivel sonoro de 71 dB con su equipamiento funcionando y un parlante situado en el comercio contiguo emitiendo música. Cuando se apaga el parlante vecino se vuelve a medir en el mismo punto, y se obtiene un valor de 65 dB. Calcular el aporte a los niveles sonoros en el local considerado que realizaba el parlante vecino cuando estaba encendido.

Resolución

L_1 = 65 dB	L_T = 71 dB
1. L_1/10= 6,5	L_T/10= 7,1
2. $10^{L1/10}$ = 3162277,66	$10^{LT/10}$ = 12589254,12

3. L_2 = 10 x log (12589254,12 - 3162277,66) = 69,7 dB

O sea: 71 dB – 65 dB = 69,7 dB.

Visto de otro modo, también se puede escribir: 65 dB + 69,7 dB = 71 dB.

También puede usarse el ábaco que se presenta en la Figura 2-2 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.

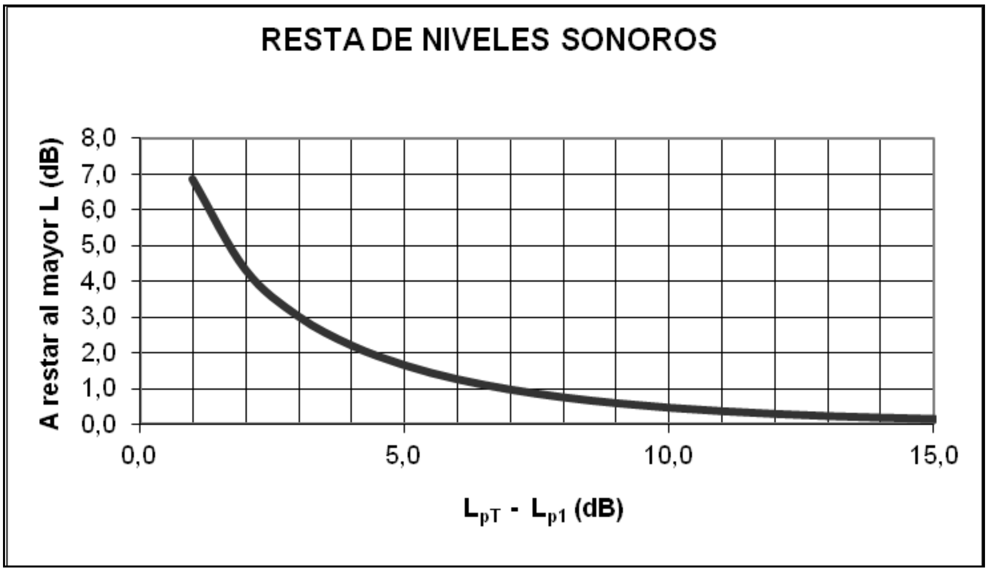


Figura 2-2. Ábaco para restar niveles sonoros

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.

3 Parámetros representativos en un intervalo de tiempo

3.1 Niveles Instantáneos de presión sonora

Dado que los niveles de presión sonora suelen ser muy variables en el tiempo, los niveles instantáneos aportan poca información útil a la hora de caracterizar, calificar o evaluar una situación, comparar valores en distintos contextos espacio-temporales, definir un patrón de comparación para una normativa, o determinar un potencial de agresión o molestia para el ser humano.

Es por ello que resulta necesario recurrir a parámetros que permitan describir de algún modo los niveles sonoros que ocurren en un lapso de tiempo. Por lo general se emplean dos tipos de descripción: una que se refiere al flujo de energía acústica que llega a un cierto punto en un cierto intervalo de tiempo, y otra que apunta a describir cuánto tiempo duran los sonidos de diferente intensidad en el intervalo considerado.

3.2 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:

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

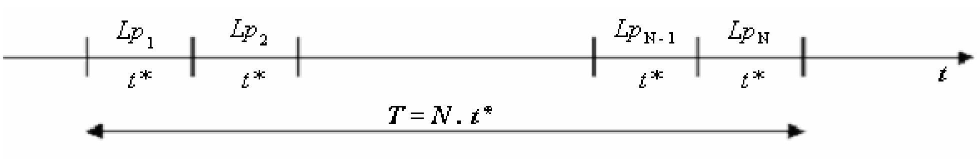
Por tratarse de una integral, las operaciones de adición, diferencia, comparación, etc. se pueden realizar en forma sencilla. Esto es de gran utilidad si se busca, por ejemplo, un nivel sonoro representativo de un intervalo de tiempo en el que se pueden reconocer distintas actividades a cada una de las 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:

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

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.

3.3 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

[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.

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. Aunque pueda parecer extraño, verificaciones realizadas en ciudades de nuestro país y de otros países han dado por resultado que conjuntos de muestras tomadas en un mismo punto geográfico, en un mismo día y en horario similar no son estadísticamente comparables. A su vez, para seleccionar las pruebas estadísticas a aplicar, se debe primero verificar si las series de datos se ajustan o no a una distribución gaussiana o normal para saber si se aplican las pruebas usuales de la estadística paramétrica o si será necesario recurrir a pruebas de la estadística no paramétrica. Las series de niveles ambientales de presión sonora suelen ser no normales, particularmente en áreas urbanas.

El uso de algunos niveles de permanencia como descriptivos del comportamiento temporal de la presión sonora puede dar información de fácil interpretación. Así el L_1 y el L_5 son representativos de los niveles de pico (los más altos), ya que son superados durante porcentajes bajos del tiempo total considerado (el 1 % y el 5 % respectivamente). El L_{10} también describe niveles de pico pero con una permanencia mayor (la décima parte del tiempo de muestreo). Es usado por unas pocas normativas internacionales como parámetro de comparación en sus estándares de ruido ambiente, entre ellas la normativa de Reino Unido y la de Hong Kong, en vez del L_{eq} como es la generalidad en ese tipo de estándares.

El L_{50} es el valor que es superado durante la mitad del tiempo de medición. Se corresponde con la mediana de los niveles sonoros en el intervalo de tiempo considerado. Su valor habitualmente es menor que el del L_{eq}, a menos que los niveles de presión sonora registrados hayan sido idénticos durante toda la medición, caso en el que ambos valores resultarían iguales.

El L_{90} describe el nivel de ruido de fondo, ya que representa el valor que es superado el 90 % del tiempo de medición. Otros niveles de permanencia más exigentes con significado similar son el L_{95} y el L_{99}. El L_{90} se considera representativo del ruido de fondo generado por fuentes cercanas y lejanas. El L_{95} se asocia con el ruido de fondo debido a las fuentes lejanas. El L_{99} es poco confiable, salvo cuando se trata de muestras de muy larga duración en las que se dispone de abundante número de datos.

Muchos instrumentos pueden dar los valores de algunos o de todos los niveles de permanencia por lectura directa, o bien acumularlos y entregarlos al recuperar en un PC los datos medidos.

Ejemplo de aplicación

16

Dada una serie de valores de presión sonora tomados cada 15 segundos (columna titulada como L_{pi} en la tabla que sigue, calcular los valores de los niveles L_{eq}, L_{10}, L_{50} y L_{90} para el tiempo total de medición de 6 minutos (360 segundos). Graficar los valores obtenidos junto con la evolución temporal de los niveles de presión sonora.

Cálculo del L_{eq}

Se aplicará paso a paso la fórmula de cálculo del L_{eq}:

$$L_{eq,T} = 10\log\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}10^{0,1\,L_{pi}}\right] = 10\log\left[\frac{1}{24}\sum_{i=1}^{24}10^{0,1\,L_{pi}}\right]$$

Para ello, en las dos primeras columnas de la tabla que sigue se presentan los datos como pares (t, L) y en la tercera, se calculan los sumandos de la forma $10^{(Lp/10)}$. Al final de la tabla se indican los valores correspondientes a la sumatoria, al argumento del logaritmo y al nivel de presión sonora continuo equivalente.

Por último, se presentan gráficamente los datos dados y el L_{eq} calculado. Nótese que las áreas que quedan situadas por encima y por debajo de la línea que representa el L_{eq} no son iguales; esto se debe a que se trata de un equivalente energético, por lo que se ve más influenciado por los valores elevados.

Datos: Niveles Sonoros tomados cada 15 segundos

t (s)	L_p (dB)	$10^{(Lp/10)}$
15	62,0	1584893,2
30	59,5	891250,9
45	58,5	707945,8
60	57,0	501187,2
75	59,3	851138,0
90	61,1	1288249,6
105	64,3	2691534,8
120	71,0	12589254,1
135	72,5	17782794,1
150	65,6	3630780,5
165	63,2	2089296,1
180	58,0	630957,3
195	73,1	20417379,4
210	71,2	13182567,4
225	64,3	2691534,8
240	66,0	3981071,7
255	67,1	5128613,8
270	65,3	3388441,6
285	61,9	1548816,6
300	60,5	1122018,5
315	62,0	1584893,2
330	63,8	2398832,9
345	62,2	1659586,9
360	63,0	1995262,3
	Suma	104338300,9
	log (Suma/N)	6,63823
	10 log(Suma/N)	**66,4**

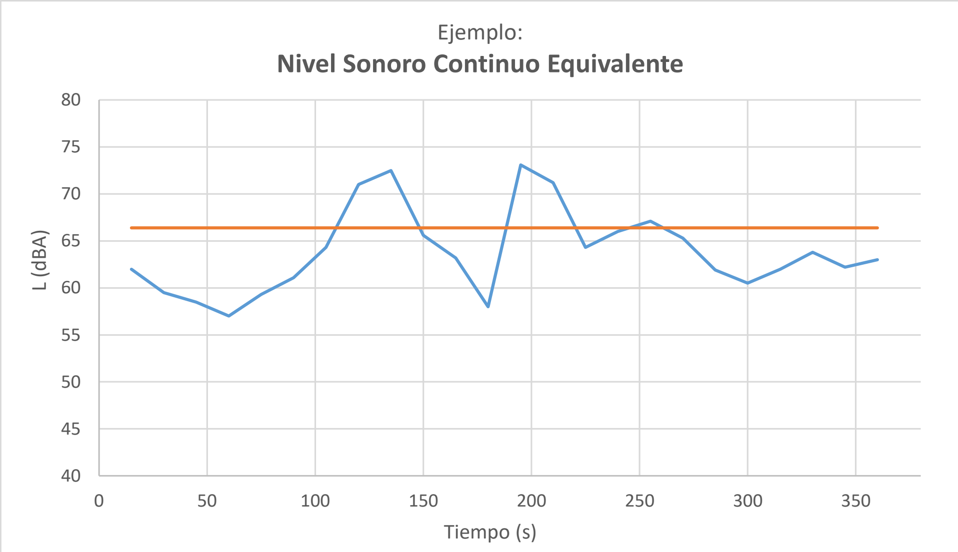


Figura 3-1. Nivel sonoro continuo equivalente

Obtención de los niveles de permanencia

Para obtener los niveles de permanencia correspondientes a la secuencia de sonidos cuyos niveles se han medido, se realiza el procedimiento que se describe a continuación y se muestra en la tabla que sigue.

	t (s)	t_{acum} (s)	% T	L_p (dB)	L_p ordenado
1	15	15	4,2	62,0	73,1
2	15	30	8,3	59,5	72,5
3	15	45	12,5	58,5	71,2
4	15	60	16,7	57,0	71,0
5	15	75	20,8	59,3	67,1
6	15	90	25,0	61,1	66,0
7	15	105	29,2	64,3	65,6
8	15	120	33,3	71,0	65,3
9	15	135	37,5	72,5	64,3
10	15	150	41,7	65,6	64,3
11	15	165	45,8	63,2	63,8
12	15	180	50,0	58,0	63,2
13	15	195	54,2	73,1	63,0
14	15	210	58,3	71,2	62,2
15	15	225	62,5	64,3	62,0
16	15	240	66,7	66,0	62,0
17	15	255	70,8	67,1	61,9
18	15	270	75,0	65,3	61,1
19	15	285	79,2	61,9	60,5
20	15	300	83,3	60,5	59,5
21	15	315	87,5	62,0	59,3
22	15	330	91,7	63,8	58,5
23	15	345	95,8	62,2	58,0
24	15	360	100,0	63,0	57,0

1. Se ordenan los niveles medidos de mayor a menor, asignándole a cada uno un ordinal (ascendente). Deben considerarse todos los datos aunque aparezcan más de una vez durante la medición.

2. El porcentaje de tiempo de muestreo superado por cada valor se calcula dividiendo el tiempo acumulado hasta el final del intervalo en cuestión entre la duración total de la medición. Cuando todos los datos corresponden a intervalos de tiempo iguales, se puede obtener dividiendo el valor del ordinal asignado entre el número total de intervalos de tiempo.

3. Los niveles de permanencia se asocian al % 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 esconveniente interpolar.

En este ejemplo, el valor de L_{10} se tomará como 71,2 dB, que estrictamente resulta ser el L_{13}, es decir, el nivel que es superado durante el 12,5 % del tiempo de muestreo. Por su parte, el L_{90} se tomará como 58,5 dB, que estrictamente es el valor del L_{92}.

De haber interpolado, el valor informado para L_{10} sería de 71,8 dB y el de L_{90}, 58,9 dB. En este caso no aparecen diferencias numéricas pero en otros, puede ser la diferencia entre cumplir o transgredir una norma.

En la figura que sigue se muestran los valores de L_{eq}, L_{10}, L_{50} y L_{90} correspondientes a este ejemplo, junto con la serie de datos dados.

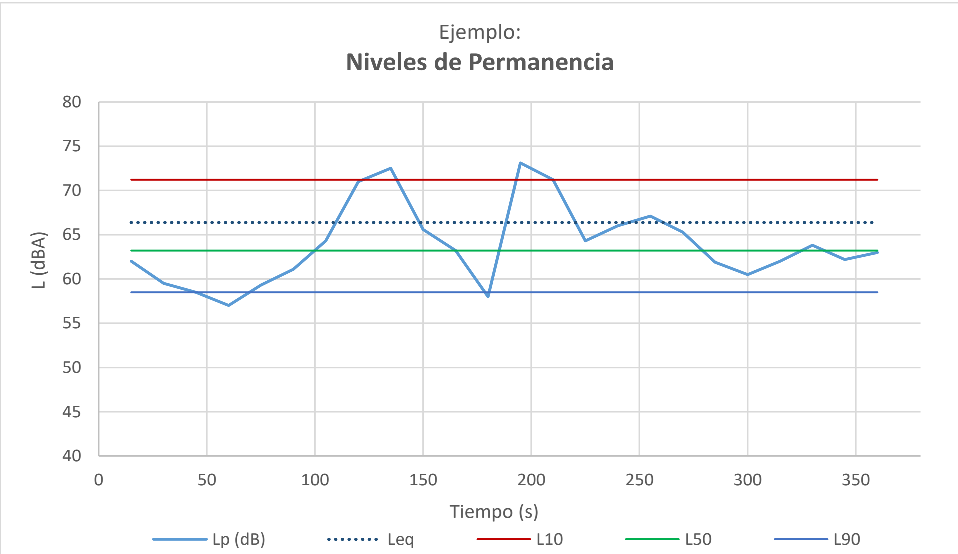


Figura 3-2. Niveles de permanencia

3.4 Curvas de permanencia

Con los niveles de permanencia obtenidos en el intervalo de tiempo considerado, se puede construir la ***curva de permanencia*** de los niveles sonoros correspondiente a ese intervalo. 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.

Ejemplo de aplicación

17 *Construir la curva de permanencia correspondiente al ejemplo anterior.*

Resolución

Para construir la curva de permanencia debe recurrirse a la mayor cantidad posible de valores. Sólo a efectos demostrativos y para reafirmar la importancia de trabajar con la mayor cantidad de información posible –siempre dentro de lo razonable-, se grafica a la izquierda la curva que se obtendría si sólo se conocieran los valores de L_{10}, L_{50} y L_{90} y a la derecha, la curva que resulta cuando se grafican los 24 niveles de permanencia obtenidos en el apartado anterior.

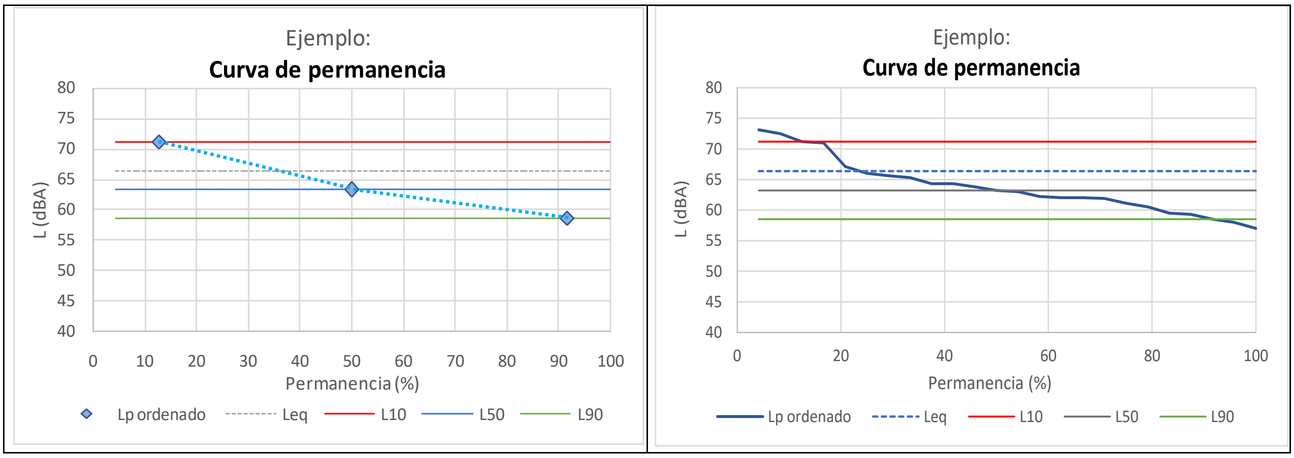


Figura 3-3. Curva de permanencia de niveles de presión sonora (izq. 3 puntos; der. 24 puntos)

4 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.

4.1 Divergencia esférica

Cuando se trata de una fuente puntual 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. 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:

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

$$L_{p,r1} = L_{p,r0} + 10 \log \left(\frac{r_0^2}{r^2} \right)$$

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

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

Entonces, si se considera la energía acústica que atraviesa la superficie de dos esferas concéntricas de radios *r* y *2r* (Figura 4-1), resulta:

$$L_{p,2r} = L_{pr} - 10 \log \left[\frac{(2r)^2}{r^2} \right] = L_{pr} - 10 \log(4) = L_{pr} - 10 \log\left(2^2\right) = L_{pr} - 20 \log(2) \cong L_{pr} - 6$$

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

$$L_{p,2d} = L_{p,d} - 6 \qquad [\mathrm{dB}]$$

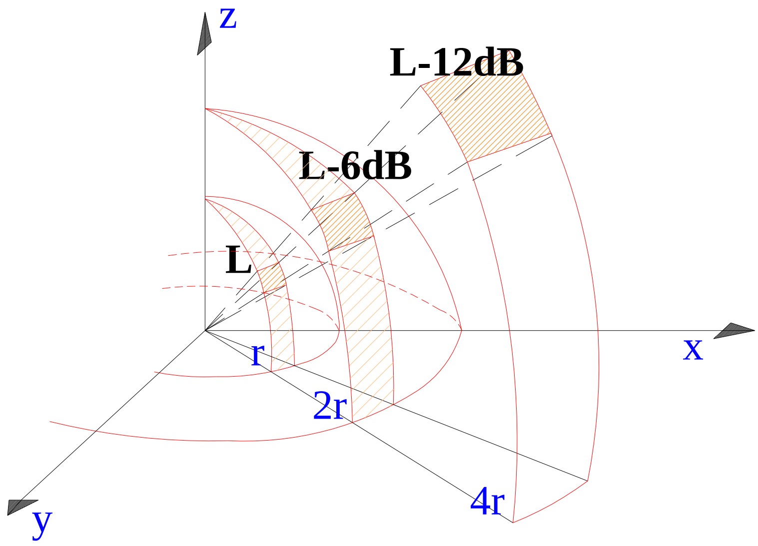


Figura 4-1. Divergencia esférica

4.2 Divergencia cilíndrica

Si se considera ahora una fuente lineal, la propagación se dará a través de la superficie de cilindros coaxiales con eje en la fuente. 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 $2\pi r l$, con r creciente. En consecuencia la intensidad (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*.

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 4-2**), resultará que el decaimiento de los niveles sonoros al pasar de uno al otro será de 3 dB:

$$L_{p,2r} = L_{pr} - 10\log\left[\frac{(2r)}{r}\right] = L_{pr} - 10\log(2) = L_{pr} - 3$$

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

$$L_{p,2d} = L_{p,d} - 3 \qquad \text{[dB]}$$

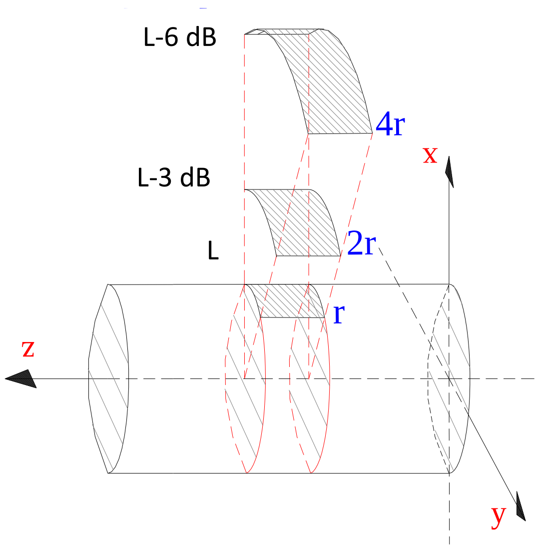


Figura 4-2. Divergencia cilíndrica

4.3 Directividad de las fuentes acústicas

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. En cualquier caso, los volúmenes en que se propaga la energía sonora emitida desde una fuente puntual dejan de asemejarse a esferas concéntricas y pasan a ser otros cuerpos, no necesariamente de revolución ni simétricos.

Para tomar en cuenta esto, se define el ***factor de directividad Q*** como el cociente entre la intensidad de la fuente real en una dirección y la intensidad de una fuente puntual omnidireccional de igual potencia acústica (Tabla 4-1). 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. A veces el factor de directividad *Q* puede visualizarse como el cociente entre el espacio teórico de propagación de una fuente puntual omnidireccional y el espacio real de propagación en que efectivamente la fuente puede irradiar.

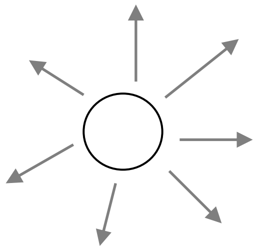
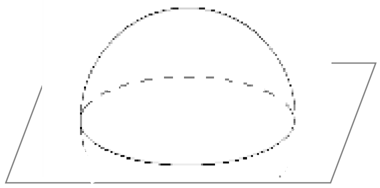
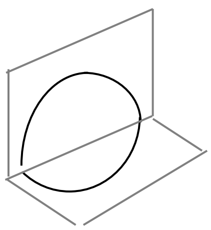
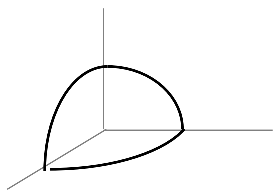
El índice de directividad ID queda definido en función del factor de directividad Q como:

$$ID = 10 \log Q$$

Luego, para obtener el nivel sonoro de una fuente no 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*:

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

Tabla 4-1. Factores e índices de directividad en casos usuales

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

Ejemplo

18

Un parlante se ubica en el ángulo superior de un local de 12 m x 7,2 m x 3,8 m. Suponiendo que se comporta como una fuente puntual omnidireccional y que no ocurre ningún fenómeno adicional a la divergencia geométrica, ¿qué potencia acústica debería tener para que el nivel de presión sonora en el extremo opuesto de la diagonal fuera de 80 dB?

Resolución:

La longitud de la diagonal es de: $(12^2+7{,}2^2+3{,}8^2)^{1/2}$ = 14,5 m

Si la fuente se considera puntual:

$$L_w = L_{p,r} + 10\log(Q) + 10\log(r^2) + 11 = 80 + 10\log(8) + 10\log(14{,}5^2) + 11 = 123{,}3\ dB$$

La potencia acústica se calcula a partir de L_w:

$$L_w = 10\log(W/W_0) = 123{,}3\ dB$$

$$W = 10^{123{,}3/10} \times 10^{-12} = 0{,}33\ W$$

19 *Manteniendo las mismas suposiciones, ¿cuál sería el nivel de presión sonora que se mediría a 1,7 m del piso, sobre la misma arista que se ubica el parlante?*

$$L_{p,r} = L_w - 10\,(r^2) - 11 = 123{,}3 - 10\log(3{,}8 - 1{,}7)^2 - 11 = 105{,}9\ dB$$

20 *¿Y si ahora la fuente estuviera en campo libre?*

Por su ubicación, la fuente tenía un factor de directividad Q = 8, que se debe descontar cuando se supone que está en campo libre. Resulta entonces:

$$L_p = L_{p,r} - 10\log Q = 105{,}9 - 10\log(8) = 96{,}9\ dB$$

5 Clasificación de Ruidos Ambientales

El ambiente cotidiano en la actualidad suele estar poblado de sonidos a los que difícilmente se les presta atención ya que no tienen características destacables. Son ruidos más o menos permanentes, y no tienen una entonación (altura) definida. Pero, por ejemplo, si de repente un ventilador encendido se detuviera o empezara imprevistamente a zumbar, el cambio podría llamar la atención e incluso molestar.

El oído reconoce información en los sonidos que escucha. La información innecesaria o que molesta pasa a ser ruido. Las características del sonido que más invitan a prestar atención son la aparición de tonos y los cambios en el nivel sonoro. Cuanto más destacable sea el tono o más abrupto el cambio de nivel sonoro, más perceptible es el ruido. De ahí que los ruidos intermitentes o fluctuantes son los más molestos y los que más perturban el rendimiento intelectual.

Es necesario clasificar y definir los distintos tipos de ruidos para realizar mediciones correctas que permitan su evaluación posterior.

Tabla 5-1. Tipos de ruido

Ruido Ambiental	Es el que resulta del conjunto de sonidos presentes en un cierto lugar y en un cierto tiempo, considerando la totalidad de las fuentes incidentes (focos próximos y lejanos). A veces se puede distinguir una fuente preponderante en el ruido ambiental, y así entonces se hablará, por ejemplo, de ruido ambiental de tráfico o industrial.
Ruido Estable	Es aquel que no sufre variaciones significativas durante el intervalo de tiempo considerado. Se considera estable al ruido cuyo nivel de presión sonora varía en un intervalo de no más de 5 dB de amplitud durante el tiempo considerado. Ejemplos típicos son el ruido de aire acondicionado, transformadores, computadoras, etc.
Ruido Fluctuante	Son los ruidos que sufren variaciones perceptibles en el tiempo. Se considera fluctuante al ruido cuya variación en el intervalo de tiempo considerado es de más de 5 dB, medido en respuesta lenta. Son ejemplos típicos el tráfico, máquinas que operan en ciclos, aviones, etc.
Ruido Impulsivo	Se define como tal al ruido de corta duración, inferior a un segundo, que excede de forma significativa el nivel de ruido ambiente. Casos típicos son el ruido de un martillo, prensas y explosiones. El ruido impulsivo es breve y abrupto, y su efecto sorpresivo causa mayor molestia que la esperada a partir de una simple medida del nivel de presión sonora. Para cuantificar el impulso del ruido se puede utilizar la diferencia entre un parámetro medido con respuesta rápida y con respuesta lenta o, mejor aún, emplear una respuesta impulsiva si el instrumento lo permite.
Ruido Tonal	Los tonos pueden ser identificados subjetivamente escuchándolos, u objetivamente mediante análisis de frecuencias. La audibilidad se calcula entonces comparando el nivel de tono con el nivel de las componentes espectrales en las bandas de tercio de octava adyacentes. También interesa cuantificar la intensidad y la duración del tono.
Ruido de Baja Frecuencia	Son ruidos con gran contenido energético en las frecuencias de 20 Hz a 100 Hz. Son típicos de grandes motores diesel, barcos, calderas, plantas de generación de energía, aerogeneradores, etc. Las bajas frecuencias son difíciles de controlar, por lo que pueden ser oídas incluso a km de la fuente. La diferencia entre los niveles sonoros ponderados en escala A y en escala C que resultan de medir una misma fuente puede indicar la existencia o no de un problema de ruido de bajas frecuencias.

6 Ruidos de Colores

De acuerdo con la distribución de la potencia acústica en el espectro de frecuencias (que se designa como *densidad espectral de potencia*), se suele hacer un paralelismo entre el espectro de la luz y el del sonido y así, definir espectros acústicos "de distintos colores". Por ejemplo, un ruido que contenga una distribución uniforme de potencia en el espectro de frecuencias sería "blanco" al igual que el color blanco contiene todas las frecuencias del espectro visible.

Genéricamente, los sonidos más graves, es decir de menores frecuencias, se asociarían al rojo y por debajo del rango audible (< 20 Hz), al infrarrojo. En el extremo opuesto, los sonidos de alta frecuencia estarían relacionados con el azul y por encima de 20.000 Hz, los ultrasonidos se asociarían con los rayos ultravioleta.

Sin embargo, sólo unos pocos colores se emplean habitualmente para designar espectros sonoros, dado que no en todos los casos hay acuerdo técnico al respecto.

6.1 Ruido blanco

El ruido blanco se caracteriza por tener la misma potencia acústica en todo el espectro de frecuencias.

Integrando en el tiempo, la energía en cada banda duplica a la de la banda anterior, dado que el ancho de las bandas se duplica hacia las altas frecuencias. En consecuencia, en el ruido blanco el nivel de presión sonora es creciente en las frecuencias, a razón de 3 dB más por banda.

Ruido Blanco: $L_p\,(BO_i) = L_p\,(BO_{i-1}) + 3$ dB

6.2 Ruido rosa

El ruido rosa se define como aquel cuya potencia acústica es inversamente proporcional a la frecuencia. En consecuencia, al integrar resulta que la energía en cada banda de octava es la misma y así, los niveles de presión sonora también son constantes en todas las bandas.

Ruido Rosa: $L_p\,(BO_i) = L_p\,(BO_{i-1})$

El ruido rosa se emplea para realizar pruebas acústicas, para calcular acondicionamiento de locales, para evaluar daño auditivo, entre otras aplicaciones.

6.3 Ruido azul

En cierta forma es el "simétrico" del ruido rosa pero en relación a la potencia acústica, que en este caso es directamente proporcional a la frecuencia. En cuanto niveles de presión sonora, crecen de a 6 dB por banda de octava.

6.4 Ruido rojo o Browniano (Ruido marrón)

En este caso la potencia acústica se relaciona con ($1/f^2$), es decir, los niveles de presión sonora decaen a razón de 6 dB por octava.

Su nombre deriva de que para generar este tipo de ruido se emplea un algoritmo que simula el movimiento browniano. Aunque claramente es un ruido con mayor contenido energético en las bajas frecuencias, o sea, corresponde la designación de ruido rojo, lo de “ruido marrón” deriva de traducir “Brown”.

6.5 Ruido violeta

La potencia acústica en el ruido violeta es directamente proporcional a f^2, es decir, el contenido energético es mucho mayor hacia los agudos.

Bibliografía

AENOR. Norma UNE-EN 61260-1:2014 “Electroacústica. Filtros de banda de octava y de bandas de una fracción de octava. Parte 1: Especificaciones” (Norma ratificada por AENOR en agosto de 2014).

Associates in Acoustics Inc., BP International Limited and the University of Wollongong. Manual del Estudiante. Ruido. Medición y sus Efectos, Enero 2009.

Gaja Díaz, Esteban. Ingeniería Acústica Ambiental. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, 251 pp. 1996.

Giménez de Paz, Juan Cruz. Ruido: para los posgrados en higiene y seguridad industrial. Editorial Nobuko. 176 pp. 2007.

González, A.E.; Acústica Urbana Módulo I, Convenio MVOTMA-UdelaR, 99 pp. 2008.

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

Jordà Puig, Sergi. *Audio digital y MIDI*, Guías Monográficas Anaya Multimedia, Madrid 1997.

Méndez, A.M.; Stornini, A.J.; Salazar, E.B.; Giuliano, H.G.; Velis, A.G.; Amarilla, B.C. Acústica Arquitectónica. Universidad del Museo Social Argentino. 238 pp. 1994.

Miyara, Federico. Control de Ruido. Ed. propia. 1999.