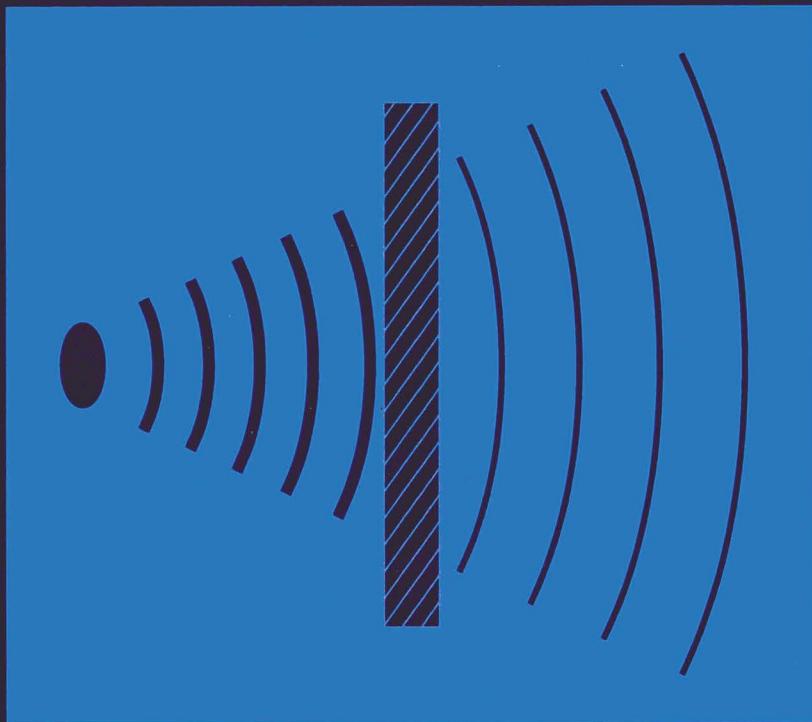


RUIDO



Problemas resueltos



MINISTERIO
DE TRABAJO
E INMIGRACIÓN



INSTITUTO NACIONAL
DE SEGURIDAD E HIGIENE
EN EL TRABAJO

RUIDO

PROBLEMAS RESUELTOS

RUIDO

PROBLEMAS RESUELTOS

Autores:

Emilio Castejón
Núria Cavallé
Juan Guasch
Ana Hernández
Pablo Luna
Cristina Vega

Centro Nacional de Condiciones de Trabajo - INSHT

Colaborador:

Miquel Graell

Ingeniero Químico IQS. Especialista en Higiene Industrial

Diseño de la cubierta:

Concepción Just

Centro Nacional de Condiciones de Trabajo - INSHT

Edita:

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
Torrelaguna, 73 – 28027 MADRID

Composición e impresión:

Centro Nacional de Condiciones de Trabajo
INSHT – BARCELONA

PRESENTACIÓN

Entre las principales actividades del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) desde su creación, figuran las que tiene relación con la formación, en el contexto de la Prevención de Riesgos Laborales, las cuales se han visto impulsadas desde la entrada en vigor de la Ley 31/1995 y del Real Decreto 39/1997, donde se regula la formación para el desarrollo de las funciones de Técnico de Prevención. Una de esas actividades es la publicación y actualización de textos con diferentes niveles de profundización, que pretenden servir de ayuda para alumnos, profesores y en general profesionales de la Prevención de Riesgos laborales.

En lo que respecta al área de Higiene Industrial, que como disciplina presenta ciertas dificultades para su comprensión, el INSHT ya ha publicado y reeditado, entre otros documentos, el texto "Higiene Industrial" (2005) y también el libro "Higiene Industrial. Problemas resueltos." (2006), en el que se muestran una buena cantidad de ejercicios prácticos con su solución calculada, casos que podrían aparecer en el escenario real del trabajo.

Ahora, con la edición y publicación de este texto de problemas de ruido, dirigido también al tipo de público mencionado, se presenta la resolución de numerosos casos sobre situaciones de ruido en ambientes laborales, que abarcan los diferentes aspectos de la medición y valoración de las exposiciones, la reducción de los niveles de ruido o los cálculos de atenuación de los protectores auditivos, tanto en situaciones en las que es posible el daño auditivo, como en aquéllas donde el ruido da lugar a molestias. La resolución de los casos se plantea bajo la normativa legal vigente y utilizando los criterios técnicos establecidos en la Guía Técnica del Real Decreto 286/2006 y los de mayor solvencia, existentes en el momento de la publicación.

*Concepción Pascual Lizana
Directora del INSHT*

ÍNDICE

SIMBOLOS Y ABREVIATURAS	11
1. CONCEPTOS BÁSICOS.....	13
2. EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL A RUIDO	31
3. PROTECCIÓN INDIVIDUAL FRENTE AL RUIDO	49
4. DISCONFORT ACÚSTICO Y OTROS PROBLEMAS RELACIONADOS CON EL RUIDO.....	55
5. REDUCCIÓN Y CONTROL DEL RUIDO	81
BIBLIOGRAFÍA	97
APÉNDICES:	
I. FORMULARIO	99
II. GLOSARIO DE TÉRMINOS	115

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

AFNOR	Asociación Francesa de Normalización
ANR	Active Noise Reduction (reducción activa del ruido), un método electrónico para suprimir ruido
ANSI	Instituto Americano de Normalización
CTE	Código técnico de la edificación
DB-HR	Documento básico de protección frente al ruido
DMP	Dosis máxima permitida
EMP	Exposición máxima permitida. Su valor es equivalente al de la DMP
EN	Norma Europea
dB	Decibelio
IRO	Índice de Ruido en Oficinas
ISO	Organización Internacional de Normalización
L_p (L)	Valor de la presión acústica, expresado en dB. En el texto se prescinde del subíndice «p»
L_w	Nivel de potencia sonora, expresado en dB
NBE-CA-88	Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Acústicas en los Edificios
NR	Curvas noise rating
P	Valor eficaz de la presión acústica, expresado en pascales (Pa)
P_0	Presión de referencia; $P_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
Pa	Pascal
PSIL	Nivel de Interferencia Conversacional Preferido
QAI	Índice de evaluación de calidad
SII	Índice de inteligibilidad del habla
SNR	Índice de reducción único
UNE	Norma Española
W	Potencia sonora en vatios
W_0	Valor de referencia; $W_0 = 1 \text{ pW} = 10^{-12} \text{ W}$

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 Un diapasón produce un tono puro con una frecuencia «f» de 440 hertzios (Hz). Tomando para la velocidad del sonido en el aire el valor 340 m/s, calcular las siguientes magnitudes del sonido considerado:

- El período.
- La longitud de onda.

SOLUCIÓN

a) El período y la frecuencia se relacionan con la ecuación

$$T = \frac{1}{f}$$

Sustituyendo:

$$T = \frac{1}{440} = 2,27 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

b) La longitud de onda «l» puede calcularse a partir de la velocidad del sonido «c» y de la frecuencia «f» mediante la ecuación

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

Por lo tanto,

$$\lambda = \frac{340}{440} = 0,773 \text{ m}$$

1.2 El límite inferior de una banda de octava es 177 Hz y el superior, 355 Hz. Calcular la frecuencia central.

SOLUCIÓN

Por definición:

$$f_c = \sqrt{f_i \cdot f_s}$$

Luego es:

$$f_c = \sqrt{177 \cdot 355} = \sqrt{62.835} = 250,7 \text{ Hz}$$

1.3 ¿Cuáles son las frecuencias límite de la banda de octava cuya frecuencia central es 2.000 Hz?

SOLUCIÓN

El límite superior « f_s » de una banda se obtiene de la ecuación

$$f_s = 2 \cdot f_i$$

El límite inferior « f_i » de una banda de octava se relaciona con la frecuencia central « f_c » de dicha banda mediante la siguiente ecuación:

$$f_i = \frac{f_c}{\sqrt{2}}, \text{ por lo tanto, } f_i = \frac{2.000}{\sqrt{2}} = 1.414,2 \text{ Hz}$$

Sustituyendo se obtiene el límite superior de una banda de octava:

$$f_s = 2 \cdot 1.414,2 = 2.828,4 \text{ Hz}$$

1.4 ¿Cuáles son las frecuencias centrales de las tres bandas de tercio de octava que están incluidas en la banda de octava cuya frecuencia central es 500 Hz?

SOLUCIÓN

Para resolver este problema se procederá por partes como sigue:

- Primero, se calcularán las frecuencias límite de la banda de octava. Apartado «a».
- Segundo, se calcularán las frecuencias límite de las bandas de tercio de octava incluidas en la banda de octava. Apartado «b».
- Tercero, se calcularán las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava. Apartado «c».

a) El límite inferior de la banda de octava se obtiene como sigue:

$$f_i = \frac{f_c}{\sqrt{2}}, \text{ sustituyendo, } f_i = \frac{500}{\sqrt{2}} = 353,6 \text{ Hz}$$

El límite superior de la banda vale:

$$f_s = 2 \cdot f_i, \text{ sustituyendo, } f_s = 2 \cdot 353,6 = 707,1 \text{ Hz}$$

b) En una banda de tercio de octava, la frecuencia superior se obtiene de la inferior multiplicándola por raíz cúbica de 2. Por lo tanto, la frecuencia superior de la primera banda de tercio de octava vale:

$$f_2 = \sqrt[3]{2} \cdot f_1, \text{ sustituyendo, } f_2 = 1,2599 \cdot 353,6 = 445,5 \text{ Hz}$$

La frecuencia f_2 es, también, la frecuencia inferior de la segunda banda de tercio de octava; cuya frecuencia superior se obtendrá de la misma forma en que se ha calculado f_2 :

$$f_3 = \sqrt[3]{2} \cdot f_2, \text{ sustituyendo, } f_3 = \sqrt[3]{2} \cdot 445,5 = 561,3 \text{ Hz}$$

La frecuencia f_3 es, también, la frecuencia inferior de la tercera banda de tercio de octava; cuya frecuencia superior f_4 coincide con la frecuencia superior de la banda de octava, ya calculada en el apartado «a».

- c) Las frecuencias centrales de las tres bandas de tercio de octava se obtienen, como las frecuencias centrales de cualquier banda de octava, calculando la media geométrica de las correspondientes frecuencias límite:

$$f_c = \sqrt{f_l \cdot f_s}$$

Por lo tanto:

$$f_{c1} = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = \sqrt{353,6 \cdot 445,5} = 396,9 \text{ Hz}$$

$$f_{c2} = \sqrt{f_2 \cdot f_3} = \sqrt{445,5 \cdot 561,3} = 500,1 \text{ Hz}$$

$$f_{c3} = \sqrt{f_3 \cdot f_4} = \sqrt{561,3 \cdot 707,1} = 630,0 \text{ Hz}$$

- 1.5** Una fuente de sonido continuo produce en un punto un nivel de presión acústica (L_p) igual a 85 dB. Calcular la presión acústica eficaz de dicho sonido, en pascales (Pa), y compararla con la presión atmosférica.

SOLUCIÓN

Por definición, el nivel de presión acústica vale:

$$L_p = 20 \cdot \lg \frac{P}{P_0}$$

Siendo,

P_0 : la presión de referencia; $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

P : valor eficaz de la presión acústica

Despejando P ,

$$\frac{L_p}{20} = \lg \frac{P}{P_0} \rightarrow 10^{\frac{L_p}{20}} = \frac{P}{P_0} \rightarrow P = P_0 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}$$

Sustituyendo valores, resulta:

$$P = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{\frac{85}{20}} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{4,25} = 0,3557 \text{ Pa}$$

Puede verse, pues, que el valor de la presión acústica producida por la fuente, 0,36 Pa, es mucho menor que la presión atmosférica, que oscila alrededor de 100.000 Pa.

1.6 Una alarma emite un sonido continuo con un nivel de potencia acústica (L_w) de 120 dB. Calcular la potencia acústica, en vatios (W), que tiene la alarma.

SOLUCIÓN

Por definición, el nivel de potencia acústica vale:

$$L_w = 10 \cdot \lg \frac{W}{W_0}$$

Siendo,

W : la potencia acústica en vatios (W)

W_0 : el valor de referencia; $W_0 = 1 \text{ pW} = 10^{-12} \text{ W}$

Despejando «W» de la anterior ecuación (de forma parecida a como se despeja «P» en la ecuación equivalente del problema anterior), se obtiene:

$$W = W_0 \cdot 10^{\frac{L_w}{10}}$$

Y, sustituyendo valores:

$$W = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{120}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{12} = 1 \text{ W}$$

1.7 Una fuente «A» de sonido continuo produce en un cierto punto «Q» una presión sonora de 0,35 pascales. Otra fuente sonora «B», parecida a la primera, produce 0,40 pascales en el mismo punto Q.

- Calcular la presión sonora en el punto Q, cuando las dos fuentes actúan simultáneamente.
- Calcular el nivel de presión sonora en el punto Q, a partir del resultado anterior.

SOLUCIÓN

- a)** Cuando se combinan dos sonidos con presiones sonoras P_A y P_B , la presión sonora resultante viene dada por la ecuación siguiente:

$$P_{A+B} = \sqrt{P_A^2 + P_B^2}$$

Sustituyendo valores, se obtiene:

$$P_{A+B} = \sqrt{0,35^2 + 0,40^2} = \sqrt{0,2828} = 0,5315 \text{ Pa}$$

- b)** Por definición, el nivel de presión sonora es:

$$L = 20 \cdot \lg \frac{P}{P_0} ; P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

Por lo tanto:

$$L_{A+B} = 20 \cdot \lg \left(\frac{0,5315}{2 \cdot 10^{-5}} \right) = 20 \cdot \lg(26.575,4) = 20 \cdot 4,4245 = 88,49 \text{ dB}$$

1.8 Considérense las dos fuentes «A» y «B» de sonido continuo del problema anterior.

- A partir de las presiones sonoras (0,35 Pa y 0,40 Pa), calcular los respectivos niveles de presión sonora en el punto Q (L_A y L_B), en decibelios.
- Mediante la fórmula de la suma logarítmica, y a partir de los niveles calculados en el apartado anterior, calcular el nivel de presión sonora global en el punto Q (L_{A+B}), en decibelios.
- Calcular de nuevo el nivel de presión sonora global en el punto Q (L_{A+B}), en decibelios, pero utilizando la gráfica de suma de decibelios.

SOLUCIÓN

- a)** Por definición, el nivel de presión sonora es:

$$L = 20 \cdot \lg \frac{P}{P_0}; P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

Por lo tanto:

$$L_A = 20 \cdot \lg \left(\frac{0,35}{2 \cdot 10^{-5}} \right) = 20 \cdot \lg(17.500) = 20 \cdot 4,2430 = 84,86 \text{ dB}$$

$$L_B = 20 \cdot \lg \left(\frac{0,40}{2 \cdot 10^{-5}} \right) = 20 \cdot \lg(20.000) = 20 \cdot 4,3010 = 86,02 \text{ dB}$$

- b)** La fórmula de suma logarítmica para dos sumandos es:

$$L_{A+B} = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{L_A}{10}} + 10^{\frac{L_B}{10}} \right)$$

Sustituyendo valores, se obtiene:

$$L_{A+B} = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{84,86}{10}} + 10^{\frac{86,02}{10}} \right) = 10 \cdot \lg(706.141.093,2) = 88,49 \text{ dB}$$

Puede comprobarse que se obtiene el mismo resultado que en el apartado «b» del problema anterior.

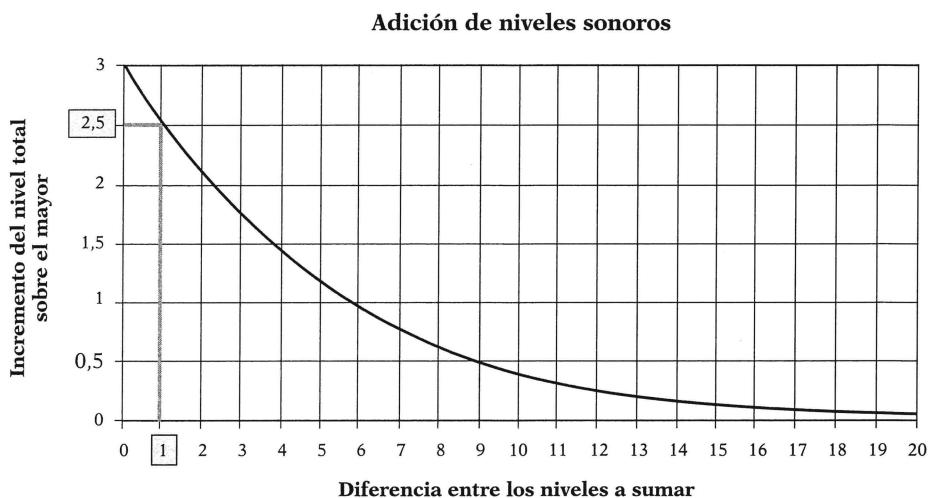
- c)** Del apartado «a», $L_A = 84,86 \approx 85 \text{ dB}$ y $L_B = 86,02 \approx 86 \text{ dB}$

En el eje de abscisas del gráfico se coloca la diferencia entre los dos niveles que se van a sumar, en este caso: $86 - 85 = 1 \text{ dB}$. A continuación se cruza el valor de esa diferencia con la curva y se lee el valor resultante del cruce en el eje de ordenadas: $2,5 \text{ dB}$.

El valor obtenido « $2,5 \text{ dB}$ » se suma al mayor de los niveles que se van a sumar

$$L_A + L_B = 86 + 2,5 = 88,5 \text{ dB(A)}$$

Valor que coincide con el valor redondeado al primer decimal obtenido en el apartado «b».



1.9 En una industria se han efectuado mediciones de ruido en las proximidades de un compresor. Con el compresor parado, el nivel de presión sonora es igual a 81,5 dB(A); y con el compresor funcionando, el nivel de presión sonora es igual a 86,4 dB(A).

- ¿Cuál es el nivel de presión sonora debido exclusivamente al compresor?
- Resolver la cuestión del apartado anterior, pero utilizando el gráfico de sustracción de decibelios.

SOLUCIÓN

- a) La ecuación para la resta de niveles de presión sonora se obtiene fácilmente a partir de la ecuación utilizada para la suma de dos niveles (véase apartado «b» del problema anterior), y es la siguiente:

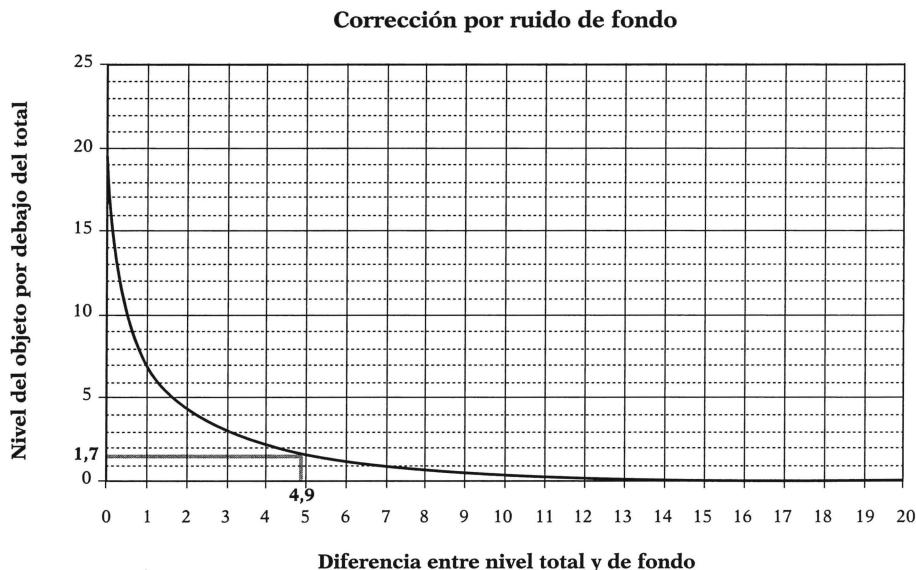
$$L_A = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{L_{A+B}}{10}} - 10^{\frac{L_B}{10}} \right)$$

Si se considera que L_B es el nivel de presión sonora del ruido de fondo, y que L_{A+B} es el nivel de presión sonora conjunto, obtenido con el compresor funcionando, entonces, el nivel de presión sonora debido exclusivamente al compresor es:

$$L_A = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{86,4}{10}} - 10^{\frac{81,5}{10}} \right) = 10 \cdot \lg (295.262.077,8) = 84,70 \text{ dB(A)}$$

- b) La resta de niveles: fondo más compresor menos fondo, de forma gráfica se lleva a cabo de la siguiente forma. En el eje de abscisas se coloca la diferencia entre el valor total (fondo + compresor) y el de fondo, $L_{A+B} - L_B = 86,4 - 81,5 = 4,9 \text{ dB}$.

A continuación se cruza ese valor con la curva del gráfico y se lee, en el eje de ordenadas, el valor de ese cruce, que aproximadamente es de 1,7 dB.



Este valor se resta al nivel total.

El valor obtenido «1,7 dB» se resta al nivel total

$$L_{A+B} - 1,7 = 86,4 - 1,7 = 84,7 \text{ dB(A)}$$

Valor que coincide con el valor obtenido en el apartado «a».

1.10 En un taller de mecanizado se piensa instalar una nueva máquina. El fabricante de la misma informa de que el nivel de presión acústica medida en el puesto del operador tiene los valores siguientes, en cada banda de octava:

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
L_p (dB)	84	81	73	79	81	80	79	72

Se piensa colocar esta máquina en un lugar de la nave donde actualmente existe un nivel de presión acústica de 87 dB(A).

- Determinar el nivel de presión acústica ponderado A (L_{pA}) de la nueva máquina.
- ¿Cuál será el L_{pA} en el puesto del operador una vez instalada la máquina?

SOLUCIÓN

- a) Para calcular el nivel de presión acústica ponderado A se puede utilizar la expresión:

$$L = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}} \quad L_A = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_i+A_i}{10}}$$

Frecuencia f_i (Hz)	Nivel L_i (dB)	Ponderación A_i (dB)	L_i+A_i (dB(A))
63	84	-26,2	57,8
125	81	-16,1	64,9
250	73	-8,6	64,4
500	79	-3,2	75,8
1.000	81	0,0	81,0
2.000	80	+1,2	81,2
4.000	79	+1,0	80,0
8.000	72	-1,1	70,9

Llevando a la ecuación anterior los valores L_i+A_i de la tabla, divididos por 10, se obtienen los valores L y L_A :

$$L = 10 \cdot \lg (10^{8,40} + 10^{8,10} + 10^{7,30} + 10^{7,90} + 10^{8,10} + 10^{8,00} + 10^{7,90} + 10^{7,20})$$

$$L = 10 \cdot \lg (797.640.927,5) = 89 \text{ dB(A)}$$

$$L_A = 10 \cdot \lg (10^{5,78} + 10^{6,49} + 10^{6,44} + 10^{7,58} + 10^{8,10} + 10^{8,12} + 10^{8,00} + 10^{7,09})$$

$$L_A = 10 \cdot \lg (414.486.926,1) = 86 \text{ dB(A)}$$

- b) El nivel de presión acústica ponderado A estimado tras la instalación de la nueva máquina se obtiene de la suma de los niveles medidos en el puesto de trabajo y de la máquina.

$$L_A = 10 \cdot \lg (10^{8,70} + 10^{8,60}) = 89,5 \text{ dB(A)}$$

1.11 Se define el ruido rosa como el sonido que tiene el mismo nivel de presión acústica en todas las bandas de octava. Considérese el ruido rosa de 90 dB por banda de octava.

- Calcular el nivel de presión acústica del ruido rosa considerado, sin aplicar ninguna ponderación frecuencial.
- Calcular el nivel de presión acústica ponderado A del ruido rosa en cuestión.
- Calcular el nivel de presión acústica ponderado C del mismo ruido rosa.

SOLUCIÓN

- a) El nivel de presión acústica del ruido rosa se obtiene por suma logarítmica de los niveles de todas las bandas de octava, esto es:

$$L = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}}$$

En consecuencia, y teniendo en cuenta que las 10 bandas de octava tienen igual nivel de presión acústica:

$$L = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^{10} 10^{\frac{90}{10}} = 10 \cdot \lg (10 \cdot 10^9) = 10 \cdot \lg (10^{10}) = 10 \cdot 10 = 100 \text{ dB}$$

- b) Para calcular el nivel de presión acústica ponderado A se puede utilizar la expresión:

$$L_A = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_i+A_i}{10}}$$

Donde « A_i » es el valor, en decibelios, de la ponderación A en la banda de octava « i ».

La tabla siguiente facilitará el cálculo:

Frecuencia f_i (Hz)	Nivel L_i (dB)	Ponderación A_i (dB)	L_i+A_i (dB(A))
31,5	90	-39,4	50,6
63	90	-26,2	63,8
125	90	-16,1	73,9
250	90	-8,6	81,4
500	90	-3,2	86,8
1.000	90	0,0	90,0
2.000	90	+1,2	91,2
4.000	90	+1,0	91,0
8.000	90	-1,1	88,9
16.000	90	-6,6	83,4

Llevando a la ecuación anterior los valores L_i+A_i de la tabla, divididos por 10, se tiene:

$$L_A = 10 \cdot \lg (10^{5,06} + 10^{6,38} + 10^{7,39} + 10^{8,14} + 10^{8,68} + 10^{9,00} + 10^{9,12} + 10^{9,10} + 10^{8,89} + 10^{8,34})$$

$$L_A = 10 \cdot \lg (5.215.934.685,6) = 97,2 \text{ dB(A)}$$

- c) Para calcular el nivel de presión acústica ponderado C se puede utilizar la expresión:

$$L_C = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_i+C_i}{10}}$$

Donde « C_i » es el valor, en decibelios, de la ponderación C en la banda de octava «i».

La tabla siguiente facilitará el cálculo

Frecuencia f_i (Hz)	Nivel L_i (dB)	Ponderación C_i (dB)	L_i+C_i (dB(C))
31,5	90	-3,0	87,0
63	90	-0,8	89,2
125	90	-0,2	89,8
250	90	0,0	90,0
500	90	0,0	90,0
1.000	90	0,0	90,0
2.000	90	-0,2	89,8
4.000	90	-0,8	89,2
8.000	90	-3,0	87,0
16.000	90	-8,5	81,5

Llevando a la ecuación anterior los valores L_i+C_i de la tabla, divididos por 10, se tiene:

$$L_C = 10 \cdot \lg(10^{8,70} + 10^{8,92} + 10^{8,98} + 10^{9,00} + 10^{9,00} + 10^{9,00} + 10^{8,98} + 10^{8,92} + 10^{8,70} + 10^{8,15})$$

$$L_C = 10 \cdot \lg(7.717.140.936,0) = 98,9 \text{ dB(C)}$$

1.12 Un ruido tiene el siguiente espectro en bandas de octava:

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
L (dB)	81,0	86,0	88,0	85,0	82,0	80,0	77,0	74,0

- Calcular el nivel de presión acústica sin ponderar «L».
- Representar gráficamente el efecto del filtro C.
- Calcular el nivel de presión acústica ponderado C « L_C » y compararlo con «L».
- Representar gráficamente el efecto del filtro A.
- Calcular el nivel de presión acústica ponderado A « L_A » y compararlo con «L».

SOLUCIÓN

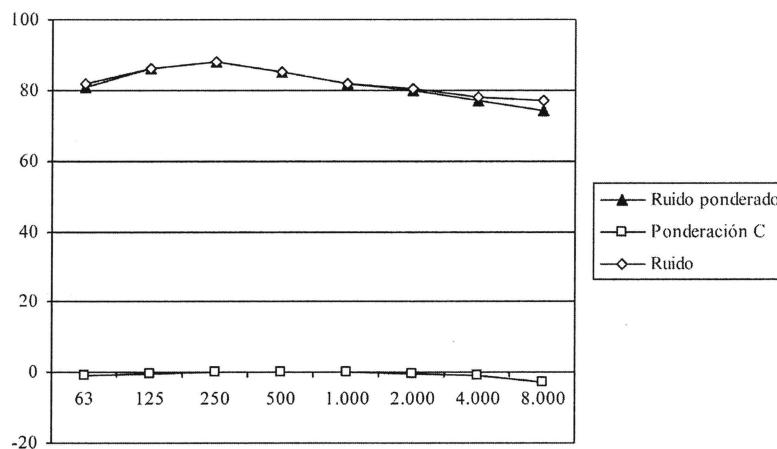
- a) El nivel de presión acústica se obtiene por suma logarítmica de los niveles de las bandas de octava, esto es:

$$L = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}}$$

El cálculo se esquematiza en la tabla siguiente, cuya última fila incluye la solución de este apartado:

Frecuencia (Hz)	L (dB)	L/10	10 ^(L/10)
63	81	8,10	1,2589·10 ⁸
125	86	8,60	3,9811·10 ⁸
250	88	8,80	6,3096·10 ⁸
500	85	8,50	3,1623·10 ⁸
1.000	82	8,20	1,5849·10 ⁸
2.000	80	8,00	1,0000·10 ⁸
4.000	77	7,70	5,0119·10 ⁷
8.000	74	7,40	2,5119·10 ⁷
Total			1,8049·10 ⁹
L = 10·lg(Total) = 92,6 dB			

- b)** El siguiente gráfico representa el efecto del filtro C sobre el nivel de presión acústica por banda de octava. Puede observarse que el filtro C modifica muy ligeramente los niveles de presión de las bandas de octava extremas.



- c)** Para calcular el nivel de presión acústica ponderado C se puede utilizar la expresión:

$$L_C = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_i + C_i}{10}}$$

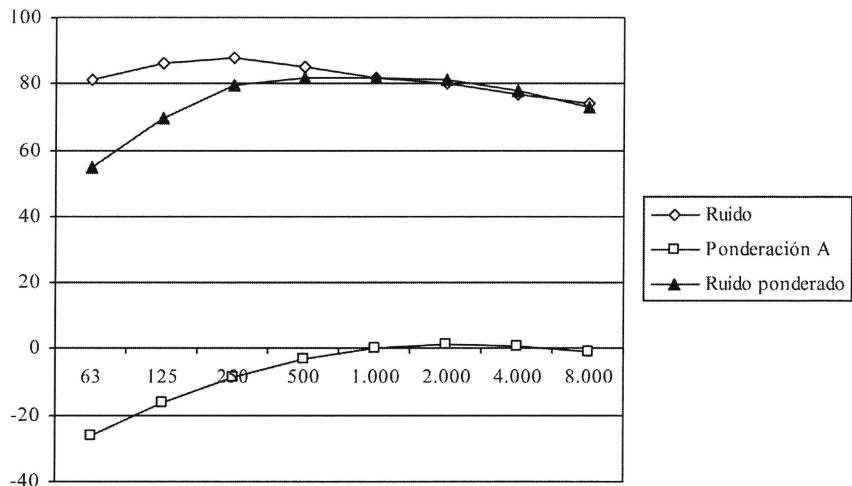
Donde «C_i» es el valor, en decibelios, de la ponderación C en la banda de octava «i».

El cálculo se esquematiza en la tabla siguiente, cuya última fila incluye la solución de este apartado:

Frec. (Hz)	L (dB)	C (dB)	L+C (dB)	(L-C)/10	$10^{((L-C)/10)}$
63	81,0	-0,8	80,2	8,02	$1,0471 \cdot 10^8$
125	86,0	-0,2	85,8	8,58	$3,8019 \cdot 10^8$
250	88,0	0,0	88,0	8,80	$6,3096 \cdot 10^8$
500	85,0	0,0	85,0	8,50	$3,1623 \cdot 10^8$
1.000	82,0	0,0	82,0	8,20	$1,5849 \cdot 10^8$
2.000	80,0	-0,2	79,8	7,98	$9,5499 \cdot 10^7$
4.000	77,0	-0,8	76,2	7,62	$4,1687 \cdot 10^7$
8.000	74,0	-3,0	71,0	7,10	$1,2589 \cdot 10^7$
Total					$1,7404 \cdot 10^9$
$L_c = 10 \cdot \lg(\text{Total}) = 92,4 \text{ dB(C)}$					

El valor de L_c de 92,4 dB(C) es muy parecido al de L de 92,6 dB, como podía esperarse a la vista del gráfico del apartado anterior.

- d) El siguiente gráfico representa el efecto del filtro A sobre el nivel de presión acústica por banda de octava. Puede observarse que el filtro A modifica significativamente los niveles de presión de las bandas de octava de frecuencias más bajas.



- e) Para calcular el nivel de presión acústica ponderado A se puede utilizar la expresión:

$$L_A = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_i + A_i}{10}}$$

Donde « A_i » es el valor, en decibelios, de la ponderación A en la banda de octava « i ».

El cálculo se esquematiza en la tabla siguiente, cuya última fila incluye la solución de este apartado:

Frec. (Hz)	L (dB)	A (dB)	L+A (dB)	(L-A)/10	$10^{((L-A)/10)}$
63	81,0	-26,2	54,8	5,48	$3,0200 \cdot 10^5$
125	86,0	-16,1	69,9	6,99	$9,7724 \cdot 10^6$
250	88,0	-8,6	79,4	7,94	$8,7096 \cdot 10^7$
500	85,0	-3,2	81,8	8,18	$1,5136 \cdot 10^8$
1.000	82,0	0,0	82,0	8,20	$1,5849 \cdot 10^8$
2.000	80,0	+1,2	81,2	8,12	$1,3183 \cdot 10^8$
4.000	77,0	+1,0	78,0	7,80	$6,3096 \cdot 10^7$
8.000	74,0	-1,1	72,9	7,29	$1,9498 \cdot 10^7$
Total					$6,2144 \cdot 10^8$
$L = 10 \cdot \lg(\text{Total}) = 87,9 \text{ dB(A)}$					

El valor de L_A de 87,9 dB(A) es significativamente diferente del valor de L (92,6 dB), como podía esperarse a la vista del gráfico del apartado anterior.

1.13 Un ruido tiene el siguiente espectro en bandas de octava:

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
L (dB)	74,0	77,0	80,0	82,0	85,0	88,0	86,0	81,0

Calcular los niveles de presión acústica sin ponderar y con las ponderaciones A y C.

SOLUCIÓN

Los tres niveles de presión acústica se pueden calcular mediante las siguientes tres ecuaciones:

$$L = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}} \quad L_C = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_i+C_i}{10}} \quad L_A = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_i+A_i}{10}}$$

Donde « C_i » y « A_i » son los valores, en decibelios, de las ponderaciones C y A, respectivamente, en la banda de octava « i ».

Los cálculos para resolver el problema se esquematizan en la tabla siguiente, cuya última fila incluye los tres resultados demandados por el enunciado:

Frec. (Hz)	L (dB)	C (dB)	A (dB)	L-C (dB)	L-A (dB)	$10^{L/10}$	$10^{(L-C)/10}$	$10^{(L-A)/10}$
63	74,0	0,8	26,2	73,2	47,8	2,51·107	2,09·107	6,03·104
125	77,0	0,2	16,1	76,8	60,9	5,01·107	4,79·107	1,23·106
250	80,0	0,0	8,6	80,0	71,4	1,00·108	1,00·108	1,38·107
500	82,0	0,0	3,2	82,0	78,8	1,58·108	1,58·108	7,59·107
1.000	85,0	0,0	0,0	85,0	85,0	3,16·108	3,16·108	3,16·108
2.000	88,0	0,2	-1,2	87,8	89,2	6,31·108	6,03·108	8,32·108
4.000	86,0	0,8	-1,0	85,2	87,0	3,98·108	3,31·108	5,01·108
8.000	81,0	3,0	1,1	78,0	79,9	1,26·108	6,31·107	9,77·107
Total						1,80·109	1,64·109	1,84·109
L=10·lg(Total)						92,6	92,1	92,6
						L	L_C	L_A

1.14 Puede observarse que los espectros de ruido de los ejercicios 12 y 13 coinciden numéricamente, pero tienen el orden invertido, como demuestra la siguiente tabla, donde R y S se refieren, respectivamente, a los ruidos de los ejercicios mencionados.

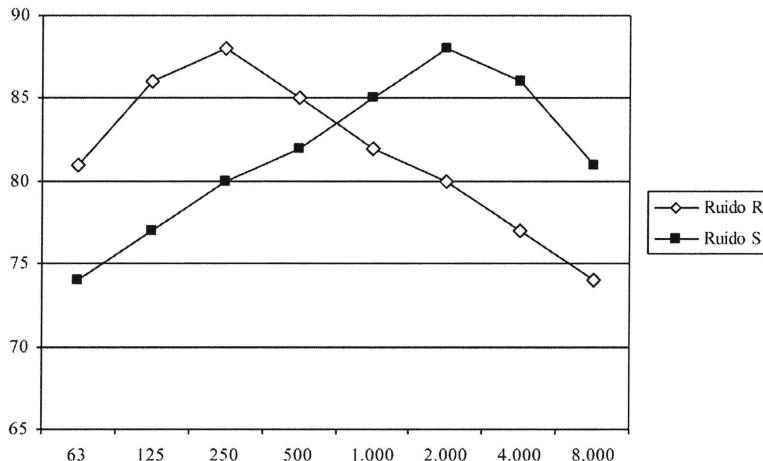
Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
L_R (dB)	81,0	86,0	88,0	85,0	82,0	80,0	77,0	74,0
L_S (dB)	81,0	86,0	88,0	85,0	82,0	80,0	77,0	74,0
Frec. (Hz)	8.000	4.000	2.000	1.000	500	250	125	63

Teniendo en cuenta la simetría de los espectros, comparar los siguientes valores y hacer los comentarios oportunos:

- Niveles de presión acústica sin ponderar de R y de S.
- Niveles de presión acústica ponderados C de R y de S.
- Niveles de presión acústica ponderados A de R y de S.
- Diferencia de niveles ponderados C y A, $L_C - L_A$, de R y de S.

SOLUCIÓN

Para facilitar el análisis, se ha preparado el gráfico y la tabla que se muestran a continuación:



Magnitud (unidades)	Ruido R	Ruido S
Nivel de presión acústica sin ponderar (dB)	92,6	92,6
Nivel de presión acústica ponderado C dB(C)	92,4	92,1
Nivel de presión acústica ponderado A dB(A)	87,9	92,6
Diferencia de niveles ponderados C y A (dB)	4,5	-0,5

- a) Los niveles de presión acústica sin ponderar de los dos ruidos considerados son iguales (92,6 dB). Ello es lógico, puesto que ambos ruidos tienen los mismos valores en su espectro, salvo el orden.
- b) El nivel de presión acústica ponderado C del ruido S es algo menor que el del ruido R (92,1dB(C) frente a 92,4 dB(C)). Ello se debe a que el filtro C tiene un efecto algo mayor en los ruidos con preponderancia de frecuencias altas (ruidos agudos). Sin embargo, la incidencia del filtro no es importante en ninguno de los dos casos.
- c) El nivel de presión acústica ponderado A del ruido R es significativamente menor que el del ruido S (87,9 dB(A) frente a 92,6 dB(A)). Ello se debe a que el filtro A tiene un efecto importante en ruidos con preponderancia de frecuencias bajas (ruidos graves).
- d) La diferencia de niveles ponderados $L_C - L_A$ es pequeña, incluso negativa en ruidos preponderantemente agudos, y se hace mayor a medida que los tonos graves van adquiriendo importancia.

1.15 En un experimento se han registrado, segundo a segundo, los valores del nivel de presión acústica ponderado A de un sonido. Los valores, en dB(A), obtenidos en 20 segundos consecutivos se indican en la siguiente tabla:

Tiempo (s)	L_A (dB(A))						
1	54	6	59	11	52	16	49
2	47	7	64	12	57	17	55
3	53	8	57	13	58	18	53
4	55	9	52	14	56	19	54
5	50	10	56	15	51	20	52

- Calcular la media aritmética de los valores.
- Calcular el nivel continuo equivalente del conjunto de datos.
- Ordenar los valores de menor a mayor, y determinar la mediana, o, lo que es equivalente en este contexto, el valor L_{50} del conjunto (este es el valor que se supera el 50% del tiempo de medición).
- Comentar los tres resultados obtenidos.

SOLUCIÓN

- a)** La media aritmética de los valores se obtiene, como es bien sabido, sumándolos todos y dividiendo entre 20, que es la cantidad de valores que hay.

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{N}$$

$$\bar{L} = \frac{54 + 47 + 53 + \dots + 54 + 52}{20} = \frac{1.084}{20} = 54,2 \text{ dB(A)}$$

- b)** El nivel continuo equivalente es un promedio energético. Para los veinte valores de nivel considerados, dicho promedio se obtiene como se indica a continuación:

$$L = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right]$$

$$L = 10 \cdot \lg \left[\frac{10^{\frac{54}{10}} + 10^{\frac{47}{10}} + 10^{\frac{53}{10}} + \dots + 10^{\frac{54}{10}} + 10^{\frac{52}{10}}}{20} \right] = 10 \cdot \lg \left(\frac{8.100.558,2}{20} \right) = 56,07 \text{ dB(A)}$$

- c)** La lista ordenada de los valores del nivel de presión acústica es la siguiente: 47, 49, 50, 51, 52, 52, 52, 53, 53, 53, 54, 54, 54, 55, 55, 55, 56, 56, 57, 57, 58, 58, 59, 64.

Por definición, la mediana (y L_{50} en este contexto) es el valor central de la lista ordenada cuando hay un número impar de elementos. Si la lista tiene un número par de elementos, el valor central se toma como la media aritmética de los dos elementos centrales, en este caso, el décimo y el undécimo. Y, puesto que el décimo y el undécimo elemento son 54, su media aritmética es 54, de manera que la mediana es:

$$\tilde{L} = L_{50} = 54 \text{ dB(A)}$$

- d) Puede observarse que los tres valores “medios” (nótese el entrecomillado) difieren entre sí. De los tres, el que tiene mayor interés para el higienista es el nivel continuo equivalente, puesto que el sonido medido producirá un efecto auditivo igual al que tendría un sonido continuo de nivel igual al calculado. Los otros dos valores centrales del conjunto de datos son mucho menos importantes, aunque el nivel L_{50} tiene interés como introducción a dos magnitudes estadísticas utilizadas en ciertas evaluaciones de ruido: los niveles L_{90} y L_{10} , que se tratan en el siguiente problema.

- 1.16** A partir de los 20 valores de nivel de presión acústica incluidos en el enunciado del problema anterior, calcular L_{90} y L_{10} .

La lista ordenada de los valores del nivel de presión acústica es la siguiente:

47, 49, 50, 51, 52, 52, 52, 53, 53, 54, 54, 55, 55, 55, 56, 56, 57, 57, 58, 59, 64

SOLUCIÓN

El percentil «n» de un conjunto de N valores, que se representa a menudo como C_n , es el valor que ocupa la posición número $(n \cdot \frac{N+1}{100})$ en el conjunto.

Por lo tanto, en la anterior lista ordenada de 20 valores, el percentil 10 es el valor que ocupa la posición

$$10 \cdot \frac{(20+1)}{100} = 2,1 \approx 2$$

y el percentil 90 es el valor que ocupa la posición

$$90 \cdot \frac{(20+1)}{100} = 18,9 \approx 19$$

El nivel L_{90} es, por definición, el nivel que es superado el 90% del tiempo. En este contexto, L_{90} coincide con el percentil 10, C_{10} . De igual forma, L_{10} , el nivel que es superado el 10% del tiempo, coincide con el percentil 90, C_{90} . Por lo tanto, como el segundo y el decimonoveno valores de la lista son, respectivamente, 49 y 59, se tiene:

$$L_{90} = 49 \text{ dB(A)}$$

$$L_{10} = 59 \text{ dB(A)}$$

2. EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL A RUIDO

2.1 ¿Cómo afectaría la aplicación del Real Decreto 286/2006 a un puesto de trabajo de trabajante que tiene una jornada laboral de 8 horas/día? La mayor parte de esa jornada está expuesto a un nivel de ruido bajo. Sin embargo, durante 15 minutos de cada hora trabaja con una centrífuga que genera un nivel de presión acústica de 85 dB(A).

SOLUCIÓN

Para la resolución de esta cuestión es preciso calcular el nivel de exposición diario equivalente, ponderado A, que viene dado por la siguiente expresión:

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \cdot \lg \frac{T}{8}$$

Siendo:

T: el tiempo de exposición al ruido de consideración. En este caso, el generado por la centrífuga, en consecuencia: $T = 8 \cdot 15 \text{ min} = 120 \text{ min}$

$$L_{Aeq,T} = 85 \text{ dB(A)}$$

$$L_{Aeq,d} = 85 + 10 \cdot \lg \frac{120}{480} = 79 \text{ dB(A)}$$

El nivel diario equivalente no supera 80 dB(A). No obstante, deberá tenerse en cuenta la incertidumbre asociada a la medición. Considerando que ésta raramente baja de 1 dB(A), el nivel diario equivalente podría ser mayor de 80 dB(A) dependiendo de que el tiempo de funcionamiento de la centrifuga sea, en alguna jornada de trabajo, ligeramente superior al considerado.

2.2 La exposición al ruido de un trabajador se puede desglosar de la siguiente forma:

$$\text{Movimiento de materiales por fábrica (5h/día)} \quad L_{Aeq,T} = 84 \text{ dB(A)}$$

$$\text{Rondas de revisión de compresores (1h/día)} \quad L_{Aeq,T} = 98 \text{ dB(A)}$$

$$\text{Rondas por la sala de calderas (1h/día)} \quad L_{Aeq,T} = 92 \text{ dB(A)}$$

$$\text{Trabajos en el almacén (1h/día)} \quad L_{Aeq,T} = 78 \text{ dB(A)}$$

$$\text{Periodos de descanso (20 min/día)} \quad L_{Aeq,T} = 75 \text{ dB(A)}$$

Determinar el nivel de presión sonora equivalente diario del puesto de trabajo.

SOLUCIÓN

Cuando el trabajador está sometido a «m» diferentes tipos de ruido, el nivel diario equivalente se calcula según las siguientes expresiones:

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^{i=m} 10^{0,1 \cdot (LAeq,d)_i} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{i=m} T_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,Ti}}$$

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} [5 \cdot 10^{8,4} + 1 \cdot 10^{9,8} + 1 \cdot 10^{9,2} + 1 \cdot 10^{7,8} + 0,33 \cdot 10^{7,5}]$$

$$L_{Aeq,d} = 90,6 \text{ dB(A)} \approx 91 \text{ dB(A)}$$

2.3 Evaluar la exposición a ruido de un trabajador que ocupa el puesto de trabajo de rectificado de piezas de acero para la industria de automoción. Su jornada laboral es de 8 horas al día y la tarea que realiza se divide en cuatro actividades básicas:

Alimentación y descarga de piezas (1 h/día)	$L_{Aeq,T} = 81 \text{ dB(A)}$
Rectificado propiamente dicho (6,25 h/día)	$L_{Aeq,T} = 84 \text{ dB(A)}$
Vigilancia del cuarto de motores (0,25 h/día)	$L_{Aeq,T} = 102 \text{ dB(A)}$
Tiempo de descanso en zona habilitada (20 min/día)	$L_{Aeq,T} = 78 \text{ dB(A)}$
Limpieza y cambio de ropa de trabajo en vestuario (10 min/día)	$L_{Aeq,T} = 78 \text{ dB(A)}$

Se pide:

- Calcular el nivel de ruido diario equivalente en este puesto de trabajo.
- Proponer el plan de medidas preventivas a adoptar.

SOLUCIÓN

a) Cuando el trabajador está sometido a «m» diferentes tipos de ruido, el nivel diario equivalente se calcula según las siguientes expresiones:

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^{i=m} 10^{0,1 \cdot (LAeq,d)_i} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{i=m} T_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,Ti}}$$

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} [1 \cdot 10^{8,1} + 6,25 \cdot 10^{8,4} + 0,25 \cdot 10^{10,2} + 0,33 \cdot 10^{7,8} + 0,17 \cdot 10^{7,8}]$$

$$L_{Aeq,d} = 88,5 \text{ dB(A)} \approx 89 \text{ dB(A)}$$

b) El nivel diario equivalente obtenido ($L_{Aeq,d}$) supera el valor límite de exposición por lo que:

- Los trabajadores expuestos y/o sus representantes deben recibir información y formación sobre los riesgos derivados de la exposición.

- Se debe establecer y ejecutar un programa de medidas técnicas y/o de organización para reducir la exposición al ruido.
- Es necesario contemplar la necesidad de señalización, delimitación y limitación de acceso.
- Los trabajadores expuestos deben utilizar obligatoriamente protectores auditivos mientras se ejecuta el programa de medidas.

2.4 Se pretende evaluar la exposición a ruido de un trabajador que ocupa un puesto de trabajo en una cadena de montaje de circuitos impresos 8 horas/día de lunes a viernes. La medición se llevó a cabo con un sonómetro tipo 2.

El resultado de la medición es el siguiente:

- El nivel sonoro es poco variable a lo largo de la jornada de trabajo y puede considerarse ruido “estable”.
 - Nivel mínimo medido: 81 dB(A)
 - Nivel máximo medido: 85 dB(A)
- Se llevaron a cabo tres mediciones más que indicaron los siguientes niveles: 82 dB(A), 82 dB(A) y 83 dB(A).
- No se aprecian ruidos de impacto.

Se pide:

- Calcular el nivel de ruido diario equivalente en este puesto de trabajo.
- Proponer el plan de medidas preventivas a adoptar.

SOLUCIÓN

a) El nivel de presión acústica continuo equivalente del periodo de tiempo «T» durante el que el ruido es estable se considera igual a la media aritmética de los niveles medidos.

$$L_{Aeq,T} = \frac{\sum L_i}{n_i}$$

$$L_{Aeq,T} = \frac{(81+82+82+83+85)}{5}$$

$$L_{Aeq,T} = 82,6 \text{ dB(A)} \approx 83 \text{ dB(A)}$$

Puesto que el ruido es estable durante toda la jornada de trabajo, $L_{Aeq,T}$ coincide con $L_{Aeq,d}$.

b) El $L_{Aeq,d}$ obtenido supera el valor inferior de exposición que da lugar a una acción, por lo que se deberán aplicar las siguientes medidas:

- Informar y formar a los trabajadores expuestos y/o sus representantes sobre los riesgos derivados de la exposición.

- Evaluar de nuevo los puestos de trabajo expuestos a este nivel cada 3 años.
- Vigilancia específica de la salud cada 5 años.
- Entrega gratuita de los protectores auditivos a todos los trabajadores expuestos a este nivel.

2.5 Se ha colocado un dosímetro sobre un trabajador durante cuatro horas, siendo el tiempo de exposición de seis horas. La lectura del dosímetro indica una dosis del 120%. Se supone que la configuración del dosímetro implica que indica el 100% de dosis si está expuesto a 85 dB(A) durante un tiempo de 8 horas.

- Calcular el $L_{Aeq,d}$ del puesto de trabajo.
- ¿Cuál es el tiempo máximo de permanencia sin protección individual, en esa situación de trabajo?
- Si el dosímetro, por error, estuviese configurado para un nivel de referencia de 90 dB(A) en vez de 85 dB(A), ¿qué $L_{Aeq,d}$ se hubiese obtenido?

SOLUCIÓN

- a)** El nivel diario equivalente se calcula según la expresión:

$$L_{Aeq,d} = L_{ref} + 10 \cdot \lg \left(\frac{\% DMP \cdot \frac{T}{T_{med}}}{100} \right)$$

$$L_{Aeq,d} = 85 + 10 \cdot \lg \left(1,2 \cdot \frac{6}{4} \right) = 87,6 \text{ dB(A)} \approx 88 \text{ dB(A)}$$

- b)** El tiempo máximo será aproximadamente de:

$$T_{max} = 8 \cdot 10^{\frac{L_{ref} - L_{Aeq,T}}{10}}$$

$$T_{max} = 8 \cdot 10^{\frac{85 - 88}{10}} = 4 \text{ horas}$$

- c)** Si el dosímetro estuviese calibrado para una referencia de 90 dB(A) en vez de 85 dB(A) y esto pasase inadvertido al usuario, la lectura de 120% en 4 horas tendría otro significado y, en este caso, el nivel equivalente diario sería:

$$L_{Aeq,d} = L_{ref} + 10 \cdot \lg \left(\frac{\% DMP \cdot \frac{T}{T_{med}}}{100} \right)$$

$$L_{Aeq,d} = 90 + 10 \cdot \lg \left(1,2 \cdot \frac{6}{4} \right) = 92,6 \text{ dB(A)} \approx 93 \text{ dB(A)}$$

2.6 Calcular el tiempo máximo permitido de exposición al ruido sin la utilización de protectores auditivos en un puesto de trabajo donde existe un nivel de ruido de 100 dB(A).

SOLUCIÓN

El tiempo máximo permitido de exposición se calcula según la siguiente expresión:

$$T_{\max} = 8 \cdot 10^{\frac{L_{\text{ref}} - L_{\text{Aeq},T}}{10}}$$

En el caso planteado y siendo el nivel de referencia de 85 dB(A):

$$T_{\max} = 8 \cdot 10^{\frac{85-100}{10}} = 0,08 \text{ horas} \approx 2 \text{ min}$$

2.7 Averiguar el porcentaje de la dosis que indicaría un dosímetro después de una medición de 8 horas, en un puesto de trabajo cuyo $L_{A_{eq,d}}$ es de 105 dB(A). Se supone que el nivel de referencia en la configuración del dosímetro es de 85 dB(A).

SOLUCIÓN

$$L_{Aeq,d} = L_{ref} + 10 \cdot \lg (\% DMP)$$

$$\% \text{DMP} = 10^{\frac{L_{Aeq,d} - L_{ref}}{10}}$$

$$\% \text{DMP} = 10^{\frac{105-85}{10}} = 100$$

$$\% \text{DMP} = 10.000$$

2.8 Deducir la ecuación general que calcula el tiempo máximo de permanencia, dado el nivel de ruido existente y el nivel diario equivalente de referencia.

SOLUCIÓN

Se parte de la expresión del nivel equivalente diario cuando predomina un determinado nivel ($L_{Aed,T}$) durante el tiempo de exposición (T_{exp}).

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \cdot \lg \frac{T_{exp}}{8}$$

Se despeja el tiempo de exposición que en este caso será el tiempo máximo de exposición para alcanzar el nivel equivalente diario de referencia. Para ello se deberán efectuar los antilogaritmos en cada miembro de la ecuación.

$$\frac{L_{Aeq,d} - L_{Aeq,T}}{10} = \lg \frac{T_{exp}}{8} \quad \left| \quad 10^{\frac{L_{Aeq,d} - L_{Aeq,T}}{10}} = 10^{\log \frac{T_{exp}}{8}} \quad \left| \quad 10^{\frac{L_{Aeq,d} - L_{Aeq,T}}{10}} = \frac{T_{exp}}{8} \quad \left| \quad 8 \cdot 10^{\frac{L_{Aeq,d} - L_{Aeq,T}}{10}} = T_{exp} \right. \right. \right. \right.$$

Es decir:

$$T_{\max} = 8 \cdot 10^{\frac{L_{\text{ref}} - L_{\text{Aeq},T}}{10}}$$

2.9. Calcular el tiempo máximo que puede permanecer un individuo expuesto a un ambiente ruidoso, donde el nivel equivalente es de 90 dB(A), para que su nivel equivalente diario correspondiente no supere el nivel superior de exposición que da lugar a una acción, tal como lo define el Real Decreto 286/2006.

SOLUCIÓN

Se parte de las expresiones halladas en el problema anterior:

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \cdot \lg \frac{T_{exp}}{8} \quad T_{max} = 8 \cdot 10^{\frac{L_{ref} - L_{Aeq,T}}{10}}$$

Como el $L_{Aeq,d}$ no debe pasar de 85 dB(A), que es el nivel de superior de exposición que da lugar a una acción según el Real Decreto 286/2006, y el nivel de ruido existente es de 90 dB(A), de acuerdo con la expresión del tiempo máximo se obtiene:

$$T_{max} = 8 \cdot 10^{\frac{85 - 90}{10}} = 2,53 \text{ horas}$$

2.10 Establecer la relación entre el parámetro de medición de dosis de ruido, %EMP (o %DMP) que indica un dosímetro (o medidor de exposición personal) y el $L_{Aeq,d}$.

SOLUCIÓN

Se parte de la expresión de %EMP

$$\%EMP = 100 \cdot \frac{T_{exp}}{T_{max}}$$

Donde T_{exp} es el tiempo de exposición y T_{max} es el tiempo máximo de permanencia a un nivel de ruido determinado en relación con un nivel de referencia.

En realidad, el dosímetro utiliza el tiempo de medición (tiempo durante el que el dosímetro está conectado), en lugar del tiempo de exposición, por lo que:

$$\%EMP = 100 \cdot \frac{T_{med}}{T_{max}}$$

Si se sustituye T_{max} por su expresión matemática y dividimos por 100, se obtiene el tanto por uno de la dosis:

$$\%_1EMP = \frac{T_{med}}{8 \cdot 10^{\frac{L_{ref} - L_{Aeq,T}}{10}}}$$

Lo habitual es que se configure el dosímetro de forma que el nivel de referencia sea 85 dB(A), esto implica que el 100%EMP corresponde a dosis equivalentes a 85 dB(A) y 8 horas de exposición.

$$\%_1EMP = \frac{T_{med}}{8 \cdot 10^{\frac{85 - L_{Aeq,T}}{10}}}$$

Extrayendo logaritmos en los dos miembros de la ecuación:

$$\lg \frac{0/}{1} \text{EMP} = \lg T_{\text{med}} - \lg 8 - \lg 10^{\frac{85 - L_{\text{Aeq,T}}}{10}}$$

Despejando:

$$\lg \frac{0/}{1} \text{EMP} = \lg T_{\text{med}} - \lg 8 - \frac{85 - L_{\text{Aeq,T}}}{10}$$

$$10 \cdot \lg \frac{0/}{1} \text{EMP} = 10 \cdot \lg T_{\text{med}} - 10 \cdot \lg 8 - (85 - L_{\text{Aeq,T}})$$

$$L_{\text{Aeq,T}} = 85 + 10 \cdot \lg \left[\frac{0/}{1} \text{EMP} \cdot \frac{8}{T_{\text{med}}} \right]$$

Teniendo en cuenta la expresión del nivel equivalente diario, en función del nivel de ruido existente y el tiempo de exposición,

$$L_{\text{Aeq,d}} = L_{\text{Aeq,T}} + 10 \cdot \lg \frac{T_{\text{exp}}}{8}$$

Sustituyendo en esta ecuación el valor de $L_{\text{Aeq,T}}$ hallado anteriormente,

$$L_{\text{Aeq,d}} = 85 + 10 \cdot \lg \left[\frac{0/}{1} \text{EMP} \cdot \frac{8}{T_{\text{med}}} \right] + 10 \cdot \lg \frac{T_{\text{exp}}}{8}$$

Agrupando términos:

$$L_{\text{Aeq,d}} = 85 + 10 \cdot \lg \left[\frac{0/}{1} \text{EMP} \cdot \frac{8}{T_{\text{med}}} \cdot \frac{T_{\text{exp}}}{8} \right]$$

Finalmente queda la expresión del nivel equivalente diario del puesto de trabajo, en función de la dosis de ruido medida por el dosímetro:

$$L_{\text{Aeq,d}} = 85 + 10 \cdot \lg \left[\frac{0/}{1} \text{EMP} \frac{T_{\text{exp}}}{T_{\text{med}}} \right]$$

Si el tiempo de medición coincide con el de exposición, entonces:

$$L_{\text{Aeq,d}} = 85 + 10 \cdot \lg \left[\frac{0/}{1} \text{EMP} \right]$$

2.11 Un técnico de prevención coloca un dosímetro a un trabajador que vigila una línea automática de fabricación situada en una nave industrial donde el nivel de presión sonora fluctúa entre 90 dB(A) y 93 dB(A). ¿Qué valor de la dosis indicará el dosímetro al cabo de dos horas de funcionamiento?

SOLUCIÓN

Partiendo de

$$\% \text{EMP} = 100 \cdot \frac{T_{\text{med}}}{T_{\text{max}}}$$

Sustituyendo el tiempo máximo por su expresión

$$\% \text{EMP} = 100 \cdot \frac{T_{\text{med}}}{\frac{L_{\text{ref}} - L_{\text{Aeq,T}}}{8 \cdot 10^{10}}}$$

Suponiendo que $L_{\text{Aeq,T}} = 93 \text{ dB(A)}$

$$\% \text{EMP} = 100 \cdot \frac{2}{\frac{85 - 93}{8 \cdot 10^{10}}} = 158\%$$

y suponiendo que $L_{\text{Aeq,T}} = 90 \text{ dB(A)}$

$$\% \text{EMP} = 100 \cdot \frac{2}{\frac{85 - 90}{8 \cdot 10^{10}}} = 79\%$$

El dosímetro indicará un valor entre 79% y el doble, 158%, ya que el nivel de ruido fluctúa entre 90 dB(A) y 93 dB(A), un nivel 3 dB mayor.

2.12 Partiendo de la expresión general del nivel equivalente diario en función de distintos niveles de presión sonora, en diferentes períodos de tiempo, deducir la expresión del $L_{\text{Aeq,d}}$ cuando predomina un mismo nivel de ruido durante la exposición.

SOLUCIÓN

La expresión del $L_{\text{Aeq,d}}$ cuando la exposición total se compone de diferentes exposiciones parciales de tiempos de duración T_1, T_2, \dots, T_n , y niveles de presión sonora respectivos L_1, L_2, \dots, L_n , es:

$$L_{\text{Aeq,d}} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \left[T_1 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}} + T_2 \cdot 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + T_n \cdot 10^{\frac{L_n}{10}} \right]$$

Cuando predomina claramente un nivel de presión sonora sobre los demás, la función exponencial deja a los niveles más bajos sin relevancia en el resultado final por lo que se pueden despreciar, y se puede simplificar la expresión anterior:

$$L_{\text{Aeq,d}} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \left[T_1 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}} \right] = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{8} \right] + 10 \cdot \lg [T_1] + 10 \cdot \lg \left[10^{\frac{L_1}{10}} \right] = 10 \cdot \lg \left[\frac{T_1}{8} \right] + L_1$$

Teniendo en cuenta que L_1 es el único nivel de presión sonora durante la exposición, se puede expresar L_1 como el nivel equivalente durante la exposición, y el tiempo es el de exposición (T_{exp}).

$$L_{\text{Aeq,d}} = L_{\text{Aeq,t}} + 10 \cdot \lg \left[\frac{T_{\text{exp}}}{8} \right]$$

2.13 Un trabajador utiliza, durante dos horas al día, una sierra radial portátil, para cortar azulejos, que genera un nivel de ruido de 100 dB(A). Durante el resto de la jornada laboral, trabaja dos horas en un ambiente donde el nivel de presión sonora es de 80 dB(A) y las restantes 4 horas el nivel de ruido es de 70 dB(A).

- d) Calcular el $L_{\text{Aeq,d}}$ correspondiente a ese puesto de trabajo en la jornada descrita.
- e) Comprobar que solo influye en el resultado final el ruido generado por la sierra.

SOLUCIÓN

a) Partiendo de la ecuación

$$L_{\text{Aeq,d}} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \left[T_1 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}} + T_2 \cdot 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + T_n \cdot 10^{\frac{L_n}{10}} \right]$$

$$L_{\text{Aeq,d}} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \left[2 \cdot 10^{\frac{100}{10}} + 2 \cdot 10^{\frac{80}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{70}{10}} \right] = 94,03 \text{ dB(A)}$$

b) Si solo se tiene en cuenta el ruido de la sierra:

$$L_{\text{Aeq,d}} = L_{\text{Aeq,t}} + 10 \cdot \lg \left[\frac{T_{\text{exp}}}{8} \right]$$

$$L_{\text{Aeq,d}} = 100 + 10 \cdot \lg \left[\frac{2}{8} \right] = 93,98 \text{ dB(A)}$$

La diferencia es irrelevante y el redondeo del nivel equivalente diario al entero más próximo da en ambos casos 94 dB(A).

2.14 En un taller de carpintería se dispone de distintas máquinas de transformación de la madera que generan altos niveles de ruido (sierra de cinta, sierra radial, lijadora, cepilladora, etc.). El funcionamiento de las distintas máquinas no es continuo y la exposición a ruido de un trabajador de la carpintería varía de una jornada a otra. El técnico de prevención, a través de la información que le suministra la empresa, construye una semana tipo, en la que los lunes, martes y miér-

coles se utiliza la sierra de cinta cuyo nivel de ruido es preponderante [100 dB(A)] durante 3 horas, mientras que el resto de la jornada (hasta las 8 horas) el nivel de ruido de fondo es de 80 dB(A). Los jueves y viernes, se utilizan otras máquinas y el nivel equivalente diario que se ha establecido por medición es $L_{Aeq,d}=82$ dB(A).

Comparar la exposición del trabajador con los valores de referencia que establece el Real Decreto 286/2006.

SOLUCIÓN

Como la exposición varía de un día a otro, se calculará el nivel equivalente semanal con la expresión:

$$L_{Aeq,s} = 10 \cdot \lg \frac{1}{5} \left[10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right]$$

Donde L_1, L_2, \dots, L_n son los respectivos niveles equivalentes diarios de los días de la semana.

De acuerdo con el enunciado, los lunes, martes y miércoles el nivel equivalente diario será el compuesto a partir del funcionamiento de la sierra de cinta y del ruido de fondo, ambos medidos por el técnico.

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \left[3 \cdot 10^{\frac{100}{10}} + 5 \cdot 10^{\frac{80}{10}} \right] = 95,8 \text{ dB(A)}$$

Por lo tanto:

Lunes, martes y miércoles, $L_{Aeq,d}=96$ dB(A)

Jueves y viernes $L_{Aeq,d}=82$ dB(A)

Ahora ya se puede obtener el nivel semanal como la media logarítmica de los niveles equivalentes diarios correspondientes a los días de la semana,

$$L_{Aeq,s} = 10 \cdot \lg \frac{1}{5} \left[10^{\frac{96}{10}} + 10^{\frac{96}{10}} + 10^{\frac{96}{10}} + 10^{\frac{82}{10}} + 10^{\frac{82}{10}} \right] = 93,9 \text{ dB(A)}$$

y redondeando resulta, $L_{Aeq,s} = 94$ dB(A)

De acuerdo con el RD 286/2006 se supera el nivel superior de exposición que da lugar a una acción [$L_{Aeq,d}$ o $L_{Aeq,s}=85$ dB(A)] por lo que deberá aplicarse un programa de medidas técnicas y organizativas para reducir la exposición al ruido y, mientras se ejecuta dicho programa, el trabajador deberá utilizar protección individual auditiva.

2.15 En un taller de calderería trabajan 15 personas expuestas a ruido durante 7,5 horas por jornada. Los niveles de ruido a los que se exponen varían continuamente de forma aleatoria debido a que se producen a menudo golpes en chapa, se utilizan herramientas portátiles (pulidoras), etc.

No obstante, por la observación del trabajo y de acuerdo con la información que el técnico de prevención recoge de la empresa, se deduce que la exposición de los 15 trabajadores del taller es equivalente (forman un grupo homogéneo de exposición), es decir, que al final todos reciben dosis similar de ruido ya que todos tienen el mismo tipo de trabajo. El técnico opta entonces por aplicar una estrategia de medición (estrategia basada en el trabajo, ISO 9612-2009) que consiste en muestrear indistintamente a algunos de los trabajadores y tratar estadísticamente las muestras.

Calcular el tiempo de muestreo necesario (tiempo total de medición) de acuerdo con la estrategia indicada.

SOLUCIÓN

La duración del muestreo en total se extrae de la tabla 1 del Apéndice I de este texto. Como el número de trabajadores es $N=15$, el tiempo en horas será:

$$5 + \left(\frac{N-5}{2} \right)$$

$$5 + \left(\frac{15-5}{2} \right) = 10 \text{ horas}$$

2.16 Respecto al enunciado del problema anterior, se decide disponer de 10 muestras, de 1 hora de duración cada una (el tiempo de duración de cada muestra debe ser el mismo y en total debe sumar 10 horas).

Los resultados de las mediciones de ruido (mediciones hechas con dosímetros sobre los trabajadores) son los siguientes (en dB(A)): 83, 87, 79, 84, 86, 83, 85, 88, 81, 86.

Calcular el nivel equivalente diario correspondiente a los trabajadores expuestos.

SOLUCIÓN

En primer lugar, se calcula el nivel equivalente durante la exposición a ruido, según la expresión:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{L_{Aeq,T,n}/10} \right]$$

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \lg \frac{1}{10} \left[10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_{10}/10} \right]$$

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \lg \frac{1}{10} \left[10^{\frac{83}{10}} + 10^{\frac{87}{10}} + 10^{\frac{79}{10}} + 10^{\frac{84}{10}} + 10^{\frac{86}{10}} + 10^{\frac{83}{10}} + 10^{\frac{85}{10}} + 10^{\frac{88}{10}} + 10^{\frac{81}{10}} + 10^{\frac{86}{10}} \right]$$

$$L_{Aeq,T} = 84,9 \text{ dB(A)}$$

Y a continuación, teniendo en cuenta el tiempo de exposición, se calcula el nivel equivalente diario, según la expresión:

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \cdot \lg \left[\frac{T}{8} \right]$$

$$L_{Aeq,d} = 84,9 + 10 \cdot \lg \left[\frac{7,5}{8} \right] = 84,6 \approx 85 \text{ dB(A)}$$

2.17 Respecto al enunciado del problema anterior, se desea conocer la incertidumbre expandida (U), asociada al valor hallado del nivel equivalente diario, que determina, para el 95% de probabilidad, el intervalo de confianza correspondiente.

SOLUCIÓN

La incertidumbre expandida es:

$$U = k \cdot u$$

Siendo:

« u » la incertidumbre combinada asociada al valor del $L_{Aeq,d}$ medido, y « k » el factor de cobertura de una distribución normal.

La norma internacional ISO 9612:2009 considera que se debe tener en cuenta el intervalo de confianza del valor del nivel equivalente diario, de un solo lado y del 95% de probabilidad ($k=1,65$), lo que significa que el 95% de los valores posibles del $L_{Aeq,d}$ están por debajo del límite superior, $[L_{Aeq,d} + U]$ o que el $L_{Aeq,d}$ es inferior a $[L_{Aeq,d} + U]$ con un 95% de probabilidad.

La incertidumbre combinada « u », en el caso de que el muestreo siga la estrategia basada en el trabajo, se calcula con la siguiente expresión:

$$u = (c_1 \cdot u_1)^2 + u_2^2 + u_3^2$$

Siendo:

« u_1 » la desviación estándar estimada de la distribución normal de los valores de los niveles de ruido medidos.

$$u_1 = \sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (L_i - \bar{L})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{[(83-84)^2 + (87-84)^2 + (79-84)^2 + (84-84)^2 + \dots + (86-84)^2]}{9}}$$

Donde:

« L_i » son los 10 niveles de presión sonora obtenidos por medición y 84 es la media aritmética de ellos.

$$u_1 = \sigma_{n-1} = 2,78 \text{ dB}$$

El producto « $c_1 \cdot u_1$ » se extrae directamente (extrapolando entre valores) de la tabla 2 del Apéndice I, en función del número de muestras ($n=10$) y de la desviación estándar de la distribución normal de los valores medidos.

$$c_1 \cdot u_1 = 1,37$$

« u_2 » y « u_3 » son los valores de la incertidumbre estándar debida al tipo de instrumento y a su posición durante la medición, cuyos valores se pueden obtener de la tabla 3 del apéndice I.

Las mediciones se han realizado con dosímetros personales, por lo que:

$$u_2 = 1,5 \text{ dB}$$

y la incertidumbre estándar de la posición del micrófono, de acuerdo con la ISO 9612:2009 se puede tomar en cualquier caso (ver tabla 4 del Apéndice I).

$$u_3 = 1 \text{ dB}$$

Sumando los distintos términos se obtiene la incertidumbre combinada:

$$u^2 = (1,37)^2 + (1,5)^2 + (1)^2 = 5,13 \text{ dB}^2 \quad u = 2,26 \text{ dB}$$

A partir de este resultado se halla la incertidumbre expandida, para una probabilidad del 95% e intervalo de confianza de un solo lado:

$$\begin{aligned} U &= k \cdot u \\ U &= 1,65 \cdot 2,26 = 3,7 \text{ dB} \end{aligned}$$

El intervalo de confianza de la franja superior será: $L_{Aeq,d} + U$

$$L_{Aeq,d} + U = 84,6 + 3,7 = 88,3 \text{ dB(A)}$$

Conclusiones:

Se puede afirmar que el nivel equivalente diario de los 15 trabajadores de la calderería, expuestos a ruido, es inferior a 88,3 dB(A) con una probabilidad del 95%, y se asume, de acuerdo con el Real Decreto 286/2006, que es en nuestro caso la normativa aplicable, que se supera el valor superior de exposición que da lugar a una acción (85 dB(A)) y el valor límite (87 dB(A)).

2.18 Un puesto de trabajo incluye dos clases diferentes de tarea. En la primera de ellas, la principal, una trabajadora atiende a una máquina de inyección de plástico en turno de mañana (alimenta la granza, activa y controla el proceso y retira las piezas conformadas). Por otra parte, durante la mañana debe controlar también el funcionamiento de un molino donde se recupera en granza el plástico

de las piezas de plástico defectuosas. El resto del tiempo hasta cumplir las 8 horas de la jornada no hay exposición relevante a ruido [$L_{Aeq,T} < 70 \text{ dB(A)}$].

El tiempo de duración de cada fase varía, pero, de la información que se recaba de la empresa, se deduce que la máquina de inyección trabaja, efectivamente, entre 5 y 6 horas por turno. El control del molino le supone 6 intervenciones diarias. Se midió el tiempo de duración de esas intervenciones y se tienen los siguientes resultados: 15, 17, 20, 14, 18 y 17 minutos.

Calcular los valores de la incertidumbre debida a la estimación del tiempo de duración de las dos tareas (u_{T_1} y u_{T_2}), que determinan la exposición al ruido.

SOLUCIÓN

En primer lugar convertiremos a horas los valores de tiempo de duración de las intervenciones en el molino: 0,25; 0,28; 0,33; 0,23; 0,30 y 0,28.

Para hallar la incertidumbre del tiempo de duración de las fases de trabajo se utiliza la siguiente expresión:

$$u_{T_i} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \left[\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 \right]}$$

Donde: «n» es el número de mediciones o estimaciones del tiempo de duración de la fase de trabajo, T_i es cada uno de los valores disponibles de esas mediciones y \bar{T} es la media aritmética de las mediciones (o estimaciones) de tiempo. Aplicando la expresión anterior a las dos fases de trabajo se tiene:

- Inyección:

$$u_{T_1} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 1} \left[(5 - 5,5)^2 + (6 - 5,5)^2 \right]} = 0,5 \text{ horas}$$

- Molino:

$$u_{T_2} = \sqrt{\frac{1}{6 \cdot 5} \left[(0,25 - 0,28)^2 + (0,28 - 0,28)^2 + (0,33 - 0,28)^2 + (0,23 - 0,28)^2 + (0,30 - 0,28)^2 + (0,28 - 0,28)^2 \right]} \\ u_{T_2} = 0,01 \text{ horas}$$

2.19 Como la exposición de la trabajadora que ocupa el puesto de trabajo del problema anterior se puede considerar compuesta de dos exposiciones diferenciadas, se realizan a lo largo de la mañana seis mediciones de ruido en el lugar que ocupa dicha trabajadora en la máquina de inyectar plástico y una medición, durante cada una de las intervenciones en el molino. Las mediciones, todas de 5 minutos de duración, se llevan a cabo con un sonómetro de clase 1. Los resultados son los siguientes:

Valores de presión sonora medidos, en dB(A)

Tipo de trabajo	Nivel de presión sonora dB(A)					
	Valores medidos					Media aritmética
Inyección de plástico	84	82	85	82	83	83
Intervención en molino de plástico	93	91	92	89	90	89

Calcular:

- c) El nivel equivalente diario correspondiente al puesto de trabajo
- d) La incertidumbre combinada del resultado.
- e) La incertidumbre expandida del resultado y comparar con los valores de referencia del Real Decreto 286/2006.

SOLUCIÓN

Para poder comparar con los valores de exposición que dan lugar a una acción que establece el Real Decreto 286/2006 se precisan el $L_{Aeq,d}$, y la incertidumbre expandida del mismo para una probabilidad del 95% (intervalo de confianza de un solo lado), es decir: $[L_{Aeq,d} + U]_{95}$.

- a) El nivel equivalente diario se calcula a partir de la composición de los $L_{Aeq,T}$ de las dos fases de trabajo mediante la expresión:

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{8} \sum_{n=1}^2 T_n \cdot 10^{L_{Aeq,T,n}/10} \right]$$

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \left[5,5 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}} + 0,28 \cdot 10^{\frac{L_2}{10}} \right]$$

Donde se han sustituido los tiempos de duración de las dos fases por sus respectivos valores medios, mientras que L_1 y L_2 son los respectivos niveles equivalentes de presión sonora durante las dos fases diferentes de trabajo, que antes se deben calcular.

Se dispone de seis mediciones de cada fase, de igual duración y el nivel equivalente en cada fase se obtiene como la media logarítmica de ellas (en este caso, como los valores no difieren más de 5 dB(A) entre sí, el valor de la media aritmética de ellos y su media logarítmica son prácticamente iguales):

$$L_1 = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{L_{Aeq,T,n}/10} \right]$$

- Inyección:

$$L_1 = 10 \cdot \lg \frac{1}{6} \left[10^{\frac{84}{10}} + 10^{\frac{82}{10}} + 10^{\frac{85}{10}} + 10^{\frac{82}{10}} + 10^{\frac{83}{10}} + 10^{\frac{83}{10}} \right] = 83,3 \text{ dB(A)}$$

- Molino:

$$L_2 = 10 \cdot \lg \frac{1}{6} \left[10^{\frac{93}{10}} + 10^{\frac{91}{10}} + 10^{\frac{92}{10}} + 10^{\frac{89}{10}} + 10^{\frac{90}{10}} + 10^{\frac{89}{10}} \right] = 90,9 \text{ dB(A)}$$

A partir de estos dos valores se calcula el nivel equivalente diario del puesto de trabajo:

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \left[5,5 \cdot 10^{\frac{83,3}{10}} + 0,28 \cdot 10^{\frac{90,9}{10}} \right] = 82,8 \text{ dB(A)}$$

- b)** Calcularemos ahora la incertidumbre combinada (estrategia de dividir el trabajo en operaciones), para lo que se utiliza la siguiente expresión para cada operación:

$$u = [c_1^2 \cdot u_1^2] + [c_1^2 \cdot u_2^2] + [c_1^2 \cdot u_3^2] + [c_2^2 \cdot u_t^2]$$

Los coeficientes de sensibilidad c_1 y c_2 son, respectivamente

$$c_1 = \frac{T_m}{8} \cdot 10^{\frac{(L_{Aeq,T_m} - L_{Aeq,d})}{10}}$$

$$c_2 = 4,34 \cdot \frac{1}{T_m} \cdot \frac{T_m}{8} \cdot 10^{\frac{(L_{Aeq,T_m} - L_{Aeq,d})}{10}}$$

Donde: « T_m » es el tiempo de duración de la fase y « L_{Aeq,T_m} » es el nivel equivalente en cada fase. Sustituyendo valores:

- Para la fase de inyección:

$$c_1 = \frac{5,5}{8} \cdot 10^{\frac{(83,3-82,8)}{10}} = 0,77 \quad c_2 = 4,34 \cdot \frac{1}{5,5} \cdot \frac{5,5}{8} \cdot 10^{\frac{(83,3-82,8)}{10}} = 0,61$$

- Para la fase de intervención en molino:

$$c_1 = \frac{0,3}{8} \cdot 10^{\frac{(90,9-82,8)}{10}} = 0,23 \quad c_2 = 4,34 \cdot \frac{1}{0,3} \cdot \frac{0,3}{8} \cdot 10^{\frac{(90,9-82,8)}{10}} = 3,53$$

En cada operación, las respectivas incertidumbres estándar, u_1 , u_2 y u_3 , son las correspondientes a los valores medidos, el instrumento de medición y la posición del micrófono. Mientras que « u_t » es la incertidumbre del tiempo de duración de la fase que ya calculamos en el problema anterior ($u_{T, \text{inyección}} = 0,5$ horas y $u_{T, \text{molino}} = 0,01$ horas).

Calculamos ahora « u_1 » para cada operación:

- Inyección:

$$u_1 = \sqrt{\frac{1}{6 \cdot 5} \left[(84 - 83,2)^2 + (82 - 83,2)^2 + (85 - 83,2)^2 + (82 - 83,2)^2 + (83 - 83,2)^2 + (83 - 83,2)^2 \right]}$$

$$u_1 = 0,48 \text{ dB}$$

• Molino:

$$u_1 = \sqrt{\frac{1}{6 \cdot 5} \left[(93 - 90,7)^2 + (91 - 90,7)^2 + (92 - 90,7)^2 + (89 - 90,7)^2 + (90 - 90,7)^2 + (88 - 90,7)^2 \right]}$$

$$u_2 = 0,67 \text{ dB}$$

Los valores de « u_2 » y « u_3 » son iguales para ambas operaciones y se extraen de las tablas 3 y 4, respectivamente, del Apéndice I.

Las mediciones se han realizado con un sonómetro de clase 1 por lo que $u_2 = 0,7 \text{ dB}$.

El valor de « u_3 » de acuerdo con la ISO 9612:2009 es $u_3 = 1 \text{ dB}$.

Ya se puede calcular la incertidumbre combinada « u »:

$$u = \sqrt{0,77^2 \cdot [0,48^2 + 0,7^2 + 1^2] + 0,61^2 \cdot 0,5^2 + 0,23^2 \cdot [0,67^2 + 0,7^2 + 1^2] + 3,53^2 \cdot 0,01^2} = 1,1 \text{ dB}$$

- c) Se calcula la incertidumbre expandida aplicando un factor $k = 1,65$, para obtener el intervalo de confianza (para el 95% de probabilidad) de un solo lado.

$$U = k \cdot u \quad U = 1,65 \cdot 1,1 = 1,8 \text{ dB(A)}$$

Las conclusiones son las siguientes:

- El nivel equivalente diario aplicable al puesto de trabajo es $L_{Aeq,d} = 83 \text{ dB(A)}$
- El cálculo de la incertidumbre expandida permite afirmar con un 95% de probabilidad y de acuerdo con lo recomendado en la ISO 9612:2009, que el Nivel equivalente diario del puesto de trabajo supera el valor inferior de exposición (80 dB(A)) del Real Decreto 286/2006, pero no alcanza el nivel superior de exposición que da lugar a una acción (85 dB(A)), ya que el intervalo para comparar con los valores de referencia del real decreto es:

$$[L_{Aeq,d} + U]_{95} = 82,8 + 1,8 = 84,6 \text{ dB(A)}$$

3. PROTECCIÓN INDIVIDUAL FRENTE AL RUIDO

3.1 Se desea estimar el nivel de presión sonora efectivo ponderado A en el oído, en un puesto de trabajo cuando se utiliza un determinado protector auditivo. Se da, no obstante, la circunstancia de que durante la jornada de trabajo, que es de 8 horas/día, el trabajador se desprende del protector de vez en cuando por diversos motivos (comunicación, molestias, etc.) de forma que el tiempo real de uso del EPI es de 7 horas.

A continuación se proporcionan datos sobre el ruido existente y las características del protector auditivo.

Espectro de frecuencias en bandas de octava del ruido en cuestión:

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
L_{pf} (dB)	100	97	95	90	90	85	82	78

Datos de atenuación del protector (datos del fabricante):

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
m_f	24,9	25,4	25,9	27,8	28,3	33,2	30,9	40,2
σ	6,4	6,1	3,8	2,5	3,4	4,9	5,2	4,9
H: Atenuación a alta frecuencia	H=27 dB							
M: Atenuación a media frecuencia	M=25 dB							
L: Atenuación a baja frecuencia	L=23 dB							
SNR: Índice de reducción único	SNR=28 dB							

Se pide calcular:

- La protección asumida del protector auditivo en cuestión.
- El nivel de presión sonora en decibelios A [dB(A)] y en decibelios C [dB(C)].
- La atenuación que supone el protector auditivo según los diferentes métodos disponibles.
- El nivel de presión sonora ponderado A al aplicar la atenuación del protector auditivo.
- El nivel diario equivalente ponderado A para una jornada laboral de 8 horas.
- El nivel diario equivalente ponderado A en el oído si utiliza el protector auditivo 7 horas/día.

SOLUCIÓN

- a) La protección asumida (APV_f) del protector se calcula a partir de los datos conocidos, por banda de octava, según la siguiente expresión:

$$APV_f = m_f - \sigma$$

Siendo:

m_f : el valor medio de atenuación por banda de octava en diferentes ensayos de laboratorio.

σ : la desviación típica obtenida en los ensayos de laboratorio.

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
m_f	24,9	25,4	25,9	27,8	28,3	33,2	30,9	40,2
σ	6,4	6,1	3,8	2,5	3,4	4,9	5,2	4,9
APV_f	18,5	19,3	22,1	25,3	24,9	28,3	25,7	35,3

- b) Los niveles de presión sonora en dB(A) y en dB(C) se establecen según las siguientes expresiones:

$$L_A = 10 \lg \sum_i 10^{\frac{L_i + A_i}{10}} \quad L_C = 10 \lg \sum_i 10^{\frac{L_i + C_i}{10}}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados:

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	GLOBAL
L	100	97	95	90	90	85	82	78	103 dB
A	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1	-1,1	
L_A	73,8	80,9	86,4	86,8	90	86,2	83	76,9	94 dB(A)
C	-0,8	-0,2	0,0	0,0	0	-0,2	-0,8	-3	
L_C	99,2	96,8	95	90	90	84,8	81,2	75	102,5 dB(A)

- c) Para el cálculo de la atenuación del protector auditivo se pueden utilizar diferentes métodos en los que intervienen los datos calculados en los apartados previos.

Método de las bandas de octava

Este método consiste en la determinación de los valores de nivel de presión sonora por banda de octava una vez aplicados la ponderación A y los valores de la protección asumida. Y la determinación, por suma logarítmica, del nivel de presión sonoro efectivo, ponderado A, según la expresión:

$$L'_A = 10 \cdot \lg \sum_{f=63Hz}^{f=8.000Hz} 10^{0,1 \cdot L'_{Af}}$$

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	GLOBAL
L	100	97	95	90	90	85	82	78	103 dB
A	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1	-1,1	
L_A	73,8	80,9	86,4	86,8	90	86,2	83	76,9	94 dB(A)
APV_f	18,5	19,3	22,1	24	24,9	28,3	25,7	35,3	37
L'_A	55,3	61,6	64,3	62,8	65,1	57,9	57,3	41,6	70 dB(A)

$$L'_A = 10 \cdot \lg (10^{5,53} + 10^{6,16} + 10^{6,43} + 10^{6,28} + 10^{6,51} + 10^{5,79} + 10^{5,73} + 10^{4,16})$$

$$L'_A = 70,3 \text{ dB(A)} \approx 70 \text{ dB(A)}$$

A la vista de los datos obtenidos, la reducción prevista del nivel de ruido es la siguiente:

$$PNR_{84} = L_A - L'_A$$

$$PNR_{84} = 94 - 70 = 24$$

Método de H, M y L

Con los valores de presión acústica ponderado A y C y los valores H, M y L se calcula el valor PNR utilizando las siguientes expresiones en función del valor de la diferencia obtenida entre L_C y L_A, que en este caso es de 9 dB.

$$\text{Si } L_C - L_A \leq 2 \text{ dB} \quad PNR = M - \frac{H - M}{4} [L_C - L_A - 2]$$

$$\text{Si } L_C - L_A \geq 2 \text{ dB} \quad PNR = M - \frac{M - L}{8} [L_C - L_A - 2]$$

$$L_C - L_A = 102,5 - 94 = 8,5 \text{ dB}$$

$$PNR = 25 - \frac{25 - 23}{8} [102,5 - 94 - 2] = 23,4$$

El nivel de presión sonora efectivo ponderado A será:

$$L'_A = 94 - 23,4 = 70,6 \text{ dB(A)} \approx 71 \text{ dB(A)}$$

Método del SNR

El nivel de presión sonora efectivo ponderado A se calcula según la siguiente expresión:

$$L'_A = L_C - SNR, \text{ sustituyendo}$$

$$L'_A = 102,5 - 28 = 74,5 \text{ dB(A)}$$

- d) El nivel de presión sonora es, de acuerdo con el espectro de frecuencias del ruido, 94 dB(A) y consideramos que, teóricamente, el protector con ese tipo de ruido lo atenúa hasta 70 dB(A), es decir, 24 dB.

- e) El nivel diario equivalente ponderado A para una jornada de 8 horas/día se calcula según la expresión:

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \cdot \lg \frac{T}{8}$$

$$L_{Aeq,d} = 94 + 10 \cdot \lg \frac{8}{8} = 94 \text{ dB(A)}$$

- f) El cálculo del nivel equivalente diario supuesto en el oído si el trabajador utiliza el protector durante 7 de las 8 horas de exposición será:

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{i=m} 10^{0,1 L_{Aeq,di}}$$

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} [7 \cdot 10^7 + 1 \cdot 10^{9,4}] = 85,4 \text{ dB(A)} \approx 85 \text{ dB(A)}$$

En consecuencia la atenuación real será:

$$\text{Atenuación real} = 94 \text{ dB(A)} - 85 \text{ dB(A)} = 9 \text{ dB(A)}$$

- 3.2** Se desea conocer el comportamiento de un protector auditivo frente a impactos procedentes de golpes con martillo cuyo nivel es $L_{pico} = 139 \text{ dB (C)}$. Los datos de atenuación son los siguientes: $H=27$, $M=25$, $L=23$
Frente al ruido de impacto se puede hacer la siguiente aproximación:

Tipo de impacto	Atenuación del protector auditivo frente al nivel de pico
Bajas frecuencias	L-5
Frecuencias medias y altas	M-5
Frecuencias altas	H

SOLUCIÓN

De acuerdo con ello y los datos de atenuación del protector, el nivel de pico atenuado (L'_{pico}) será, en este caso:

$$L'_{pico} = L_{pico} - (M - 5)$$

$$L'_{pico} = 139 - (25 - 5) = 119 \text{ dB(C)}$$

- 3.3** El nivel de presión sonora en el cuarto de motores de una industria es de 102 dB(A), por lo que se decide que los trabajadores utilicen protectores auditivos cuando deban permanecer en ese cuarto y mientras se ejecuta el programa de medidas destinado a reducir la exposición.

Para calcular el nivel sonoro percibido por un trabajador que utiliza un protector es necesario conocer la atenuación del protector en cada banda de frecuencia (APV_f) y el espectro del ruido ($L_{p,f}$). Ambos datos se proporcionan en la tabla siguiente:

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
L_{pf} (dB)	98	101	101	98	97	95	92	91
APV_f	2,0	2,4	6,8	9,8	15,7	21,6	22,8	21,4

Se pide:

- Calcular el nivel sonoro percibido con el uso de este protector.
- Cuál es la nueva situación del puesto de trabajo con relación a lo dispuesto en el RD 286/2006, sobre protección de los trabajadores frente a los riesgos derivados de la exposición al ruido durante el trabajo.

SOLUCIÓN

- a) Aplicando el método de las bandas de octava, en cada banda se resta algebraicamente la corrección de la escala A y el valor de la atenuación esperada del protector.

El nivel ponderado A que percibirá el trabajador al usar el protector se obtiene mediante la suma logarítmica de los niveles resultantes en cada banda de octava a partir de la siguiente expresión:

$$L'_A = 10 \cdot \lg \sum_{f=63Hz}^{f=8.000Hz} 10^{0,1L'_{Af}}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las diferentes operaciones efectuadas:

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	GLOBAL
L	98	101	101	98	97	95	92	91	107 dB
A	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1	-1,1	
L'_A	71,8	84,9	92,4	94,8	97	93,8	91	89,9	102 dB(A)
APV_f	2,0	2,4	6,8	9,8	15,7	21,6	22,8	21,4	27
L'_A	69,8	82,5	85,6	85	81,3	72,2	68,2	68,5	90 dB(A)

$$L'_A = 10 \cdot \lg (10^{6,98} + 10^{8,25} + 10^{8,56} + 10^{8,5} + 10^{8,13} + 10^{7,22} + 10^{6,82} + 10^{6,85})$$

$$L'_A = 90,1 \text{ dB(A)} \approx 90 \text{ dB(A)}$$

- b) El nivel diario equivalente, si el trabajador utiliza el protector auditivo durante los 15 minutos que permanece en el cuarto de motores, se obtiene de la forma siguiente:

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^{i=m} 10^{0,1(L_{Aeq,d})_i} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{i=m} T_i \cdot 10^{0,1L_{Aeq,Ti}}$$

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} [1 \cdot 10^{8,1} + 6,25 \cdot 10^{8,4} + 0,25 \cdot 10^9 + 0,33 \cdot 10^{7,8} + 0,17 \cdot 10^{7,8}]$$

$$L_{Aeq,d} = 83,9 \text{ dB(A)} \approx 84 \text{ dB(A)}$$

El $L_{Aeq,d}$ obtenido teniendo en cuenta que se utiliza el protector auditivo es inferior al valor límite y al valor superior de exposición que da lugar a una acción, pero a todos los efectos se considera que el $L_{Aeq,d}$ del puesto de trabajo es de 89 dB(A) y por lo tanto se deberán seguir aplicando las medidas preventivas contempladas en el ejercicio anterior, además de:

- Evaluar de nuevo los puestos de trabajo expuestos cada año.
- Realizar la vigilancia específica de la salud cada 3 años.

Nota: Los resultados de este ejercicio deben interpretarse como mínimos a efectos únicamente de cálculo. En el momento de realizar la evaluación de riesgos con los protectores auditivos colocados, según dispone el RD 286/2006 en su artículo 5.2, deberán tenerse en cuenta los factores que restan eficacia a los protectores auditivos (tiempo de utilización, defectos de adaptación al pabellón auditivo, mala colocación, etc.).

4. DISCONFORT ACÚSTICO Y OTROS PROBLEMAS RELACIONADOS CON EL RUIDO

4.1 Se desea saber si el nivel de inteligibilidad verbal en unas oficinas bancarias de atención al cliente (comunicación directa) es adecuado teniendo en cuenta las condiciones existentes en las mismas. Para ello se han medido los niveles de presión sonora equivalente en las bandas de octava 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz en la posición del oyente y durante el periodo de la jornada en el que es más probable que se dé un problema de inteligibilidad. Dicho periodo corresponde al comprendido entre las 10:00 y las 13:00 horas, ya que es entonces cuando se da una mayor afluencia de clientes. Los resultados obtenidos aparecen en la siguiente tabla. Entre el puesto del trabajador y el cliente existe un mostrador y una mesa que los separa 1 metro.

Frec. (Hz)	500	1.000	2.000	4.000
$L_{N,i}$ dB(A)	53,0	49,5	51,5	47,5

- a) ¿Es posible evaluar la situación descrita mediante el método SIL?
- b) Calcular el valor de L_{SIL}
- c) ¿La comunicación es “normal prolongada” o “crítica”?
- d) Suponiendo que los hablantes y los oyentes son nativos y menores de 60 años sin reducción de sus capacidades auditivas, ¿es satisfactoria la inteligibilidad verbal? Si no lo es, ¿qué medidas se podrían implantar para mejorar la situación?

SOLUCIÓN

- a) Sí, ya que en el puesto de trabajo que se ha de evaluar las comunicaciones son directas persona a persona, entre personas que se encuentran en el mismo entorno y no utilizan dispositivos electroacústicos o sistemas de comunicación personales como teléfonos e intercomunicadores.
- b) El valor de L_{SIL} se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$L_{SIL} = \frac{1}{4} \sum L_{N,i}$$

$$L_{SIL} = \frac{1}{4} (53,0 + 49,5 + 51,5 + 47,5) = 50,3 \text{ dB(A)} \approx 50 \text{ dB(A)}$$

- c) Se trata de una comunicación persona a persona normal prolongada, ya que

la comunicación suele ser relajada y se desarrolla durante períodos de tiempo prolongados.

- d) De acuerdo con los datos de la tabla 5 del Apéndice I, la distancia máxima a la que se considera que la comunicación es satisfactoriamente inteligible es de 0,5 metros. Sabiendo que la separación existente entre cliente y trabajador es de 1 metro, se deduce que la inteligibilidad verbal no es satisfactoria.

Se podrá optar por implantar medidas que reduzcan el L_{SIL} , como, por ejemplo instalar mamparas entre los trabajadores del banco o disminuir las distancias entre el hablante y el oyente.

- 4.2** En un área de una planta industrial, se ha obtenido el espectro de frecuencias en bandas de octava del nivel de presión sonora que aparece en la siguiente tabla. Se pide determinar la distancia máxima entre el orador y el oyente (ambos hombres) para que se puedan comunicar a un nivel de voz normal.

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
L_{N_i} dB(A)	59	65	70	73	69	65	59	50

SOLUCIÓN

El valor L_{SIL} se calcula promediando los niveles de presión sonora en las bandas de octava de 500, 1000, 2000 y 4000 Hz (las más importantes para la comunicación):

$$L_{SIL} = \frac{1}{4} \cdot (73 + 69 + 65 + 59) = 66,5 \text{ dB} \approx 67 \text{ dB}$$

La distancia máxima entre personas para mantener conversaciones con **voz normal** viene dada por la siguiente ecuación:

$$L_{SIL} = K - \lg(r)$$

Siendo:

r: distancia entre orador y oyente (m)

K: constante que se puede obtener a partir de la tabla 8 del Apéndice I

$$L_{SIL} = 67 = 54 - 20 \lg(r)$$

$$r = 10^{-\frac{13}{20}} = 0,22 \text{ m}$$

Esta distancia implica que las dos personas deberían situarse bastante cerca la una de la otra.

En el caso de conversar con **voz elevada**, la distancia máxima entre dos personas sería:

$$r = 10^{-\frac{7}{20}} = 0,45 \text{ m}$$

La distancia continua siendo demasiado grande para considerarse confortable. Si se hablara utilizando **voz fuerte**, la distancia debería ser como máximo:

$$r = 10^{\frac{1}{20}} = 0,89 \text{ m}$$

4.3 El trabajo en una oficina de extranjería se desarrolla en una gran sala con varias mesas de trabajo separadas por biombos. Una de las principales tareas de los empleados es la atención individualizada al público, con quien normalmente deben desarrollar conversación oral. La distancia entre los asientos del hablante y el oyente (poco más que el ancho de la mesa que les separa) está entre 0,6 m y 0,7 m.

Se desea valorar el ruido molesto proveniente de los impulsos cercanos del sistema centralizado de aire acondicionado por su interferencia y enmascaramiento de las conversaciones.

SOLUCIÓN

La medición de los niveles de presión sonora en bandas de octava depara el espectro de frecuencias que aparece en la siguiente tabla:

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
L_{Ni} (dB(A))	88	80	70	64	56	48	43	35

El L_{SIL} calculado será:

$$L_{SIL} = \frac{1}{4}(64 + 56 + 48 + 43) = 52,75 \text{ dB(A)} \approx 53 \text{ dB(A)}$$

De este resultado y comparando con los valores orientativos de las tablas 5 y 6 del Apéndice I se deduce que, para una buena comunicación oral en estas circunstancias, la distancia máxima entre el empleado y el público corresponde a:

- Entre 0,31 m y 0,56 m para hablantes y/u oyentes nativos
- Entre 0,19 m y 0,35 m si se trata de hablantes y/u oyentes no nativos

En conclusión y en lo que se refiere a la posible interferencia conversacional y malestar que ello supone, el nivel de ruido generado por el sistema de aire acondicionado sobrepasa el límite de lo recomendado por el criterio SIL. Obsérvese, en el espectro de frecuencias, que los niveles de presión sonora a frecuencias bajas son muy elevados pero no intervienen en el cálculo del SIL. Dependiendo de factores como el registro individual de las personas que participan en la conversación o su umbral de audición, los hablantes deberán forzar ligeramente la voz.

4.4 En una nave industrial con ruido, se pretende evaluar la efectividad de la comunicación entre dos personas con audición normal, escucha biaural y sin

protector auditivo. La distancia entre el hablante y el oyente es de dos metros y el esfuerzo vocal del hablante se considera un “grito”.

Se ha medido el nivel de ruido en la nave industrial en cada banda de octava (BL_i), obteniéndose los valores siguientes:

Frec. (Hz)	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
BL_i (dB)	85,1	80,7	81,5	87,9	90,9	79,1

Calcular el Índice de Inteligibilidad del Habla (SII) por el método de bandas de octava a partir de los valores que aparecen en la tabla siguiente:

f_i (Hz)	E_i (dB)	G_i (dB)	$BW_{adj.}$ (dB)	HL (dB)	X_i (dB)	U_i (dB)	I_i (dB ²)
250	42,5	0	22,47	0	-3,9	34,75	0,0617
500	49,24	0	25,48	0	-9,7	34,27	0,1671
1.000	51,31	0	28,49	0	-12,5	25,01	0,2373
2.000	44,32	0	31,51	0	-17,7	17,32	0,2648
4.000	34,41	0	34,52	0	-25,9	9,33	0,2142
8.000	20,72	0	37,53	0	-7,1	1,13	0,0549

Siendo:

E_i : nivel normalizado del espectro del habla para cada banda de octava «i». En este caso se han seleccionado los niveles del espectro del habla normalizados para un esfuerzo vocal considerado como “grito”.

G_i : pérdida/ganancia por inserción del protector auditivo o del sistema de amplificación.

$BW_{adj.}$: ajuste para convertir el nivel en banda de octava al nivel de un espectro de banda limitada.

HL : nivel medio del umbral auditivo. En este caso se considera de 0 dB (personas jóvenes y sanas).

X_i : nivel equivalente del espectro de ruido interno.

U_i : nivel normalizado del espectro del habla con un esfuerzo vocal normal.

I_i : Función de importancia de banda.

SOLUCIÓN

Paso 1:

El nivel equivalente del espectro del habla (E'_i) se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$E'_i = E_i - 20 \cdot \lg(d/d_0) + G_i$$

Siendo « d/d_0 » el ratio de la distancia real entre el oyente y el hablante (d , en metros) a la distancia de referencia ($d_0 = 1$ metro). En este problema el ratio es 2.

Paso 2:

El nivel equivalente del espectro del ruido (N'_i) es el nivel de ruido que se mediría en mitad de la cabeza del oyente si éste no estuviera presente, calculado de la forma siguiente:

$$N'_i = BL_i - BW_{adj} + G_i$$

Si la escucha es monoaural (por ejemplo, a través del teléfono), el nivel equivalente del umbral de audición (T'_i) es igual al nivel medio del umbral auditivo, es decir, $T'_i = HL$.

Si la escucha es biaural, $T'_i = HL - 1,7$ dB. En este caso, puesto que todos los valores de HL son de 0 dB, $T'_i = -1,7$ dB.

Paso 3:

Determinar el nivel equivalente del espectro de enmascaramiento (Z'_i). Puesto que se utiliza el método de las bandas de octava, $Z'_i = N'_i$

Paso 4:

Determinar el nivel equivalente del espectro de ruido interno (X'_i) a partir de la siguiente expresión:

$$X'_i = X_i + T'_i$$

Paso 5:

Determinar el nivel equivalente del espectro de perturbación (D'_i), que es equivalente al mayor de los dos espectros calculados en los pasos 3 y 4:

$$D'_i = \text{Max}(Z'_i \cdot X'_i)$$

Paso 6:

Calcular el factor del nivel de distorsión (L_i) a partir de la siguiente expresión:

$$L_i = 1 - \left[\frac{(E'_i - U_i - 10)}{160} \right]$$

El valor máximo de esta variable es 1.

Paso 7:

Primero se calcula una variable temporal, K_i , de la manera siguiente:

$$K_i = \frac{(E'_i - D'_i + 15)}{30}$$

Si los resultados son mayores de 1, la variable se considera 1. Si son menores de 0, la variable se considera 0.

A continuación se calcula la función de audibilidad de banda (A_i):

$$A_i = L_i \cdot K_i$$

Paso 8:

El SII se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$SII = \sum (I_i \cdot A_i)$$

Nota: todos los componentes de las ecuaciones anteriores tienen unidades de dB, excepto I_i , en dB^2 , y K_i y SII, que son adimensionales.

A continuación se muestra una tabla resumen en la que aparecen los valores obtenidos en cada uno de los pasos anteriores:

Paso 1	Paso 2		Paso 3	Paso 4	Paso 5	Paso 6	Paso 7		Paso 8	
CF_i	E'_i	N'_i	T'_i	Z_i	X'_i	D_i	L_i	K_i	A_i	$I_i A_i$
250	36,5	62,6	-1,7	62,6	-5,6	62,6	1	0	0	0
500	43,2	55,2	-1,7	55,2	-11,4	55,2	1	0,1	0,1	0,02
1.000	45,3	53,0	-1,7	53,0	-14,2	53,0	0,9	0,2	0,2	0,05
2.000	38,3	56,4	-1,7	56,4	-19,4	56,4	0,9	0	0	0
4.000	28,4	56,4	-1,7	56,4	-27,6	56,4	0,9	0	0	0
8.000	14,7	41,6	-1,7	41,6	-8,8	41,6	1	0	0	0
										SII=0,071

El método indica un SII del 1,7%. Cuando el SII es inferior a 0,45 la comunicación se considera "deficiente". En este caso, el SII es inferior a 0,1 por lo que el oyente no es capaz de comprender la mayor parte de las palabras dirigidas hacia él. Si la distancia entre el hablante y el oyente se redujera a tan sólo 0,17 metros, el SII aumentaría hasta 0,3179, pero, aun así, la situación continuaría siendo inadecuada para una comunicación aceptable.

4.5 Evaluar la situación del problema anterior en el caso de que el oyente presente una pérdida auditiva por conducción y utilice un protector auditivo de elevada atenuación.

La pérdida/ganancia por inserción del protector auditivo (G_i) se muestra en la tabla siguiente:

Frec. (Hz)	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
G_i (dB)	25,7	38,8	42,2	38,8	41,6	42,7

SOLUCIÓN

	Paso 1	Paso 2		Paso 3	Paso 4	Paso 5	Paso 6	Paso 7		Paso 8
CF_i	E'_i	N'_i	T'_i	Z_i	X'_i	D_i	L_i	K_i	A_i	I_iA_i
250	10,8	36,9	28,3	36,9	24,4	36,9	1	0	0	0
500	4,4	16,4	13,3	16,4	-3,6	16,4	1	0,1	0,1	0,02
1.000	3,1	10,8	33,3	10,8	20,8	20,8	1	0	0	0
2.000	-0,5	17,6	28,3	17,6	10,6	17,6	1	0	0	0
4.000	-13,2	14,8	23,3	14,8	-2,6	14,8	1	0	0	0
8.000	-28	-1,1	63,3	-1,1	56,2	56,2	1	0	0	0
										SII=0,017

Obviamente en este caso la comunicación será muy difícil. Incluso reduciendo la distancia a unos pocos centímetros (gritando en el oído del oyente), la comunicación sería deficiente.

4.6 Evaluar de nuevo el caso del problema 4.5 teniendo en cuenta que se dispone de los niveles en banda de octava del ruido de fondo y de la fuente de la señal (en este caso, un sistema de PA). Ambos niveles se han obtenido en la posición de la cabeza del receptor y se indican en la tabla siguiente:

Frec. (Hz)	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
BL_i (dB)	80	80	80	80	80	80
BL_iPA (dB)	80	85	90	90	90	90

SOLUCIÓN

Puesto que los niveles de sonido se han medido en la posición de la cabeza del oyente, d/d_0 es 1, de forma que:

$$E'_i = E_i + G_p \text{ donde } E_i = BL_iPA - BW_{adj}$$

El resto de pasos son iguales a los del problema anterior y los resultados se muestran en la siguiente tabla:

	Paso 1	Paso 2		Paso 3	Paso 4	Paso 5	Paso 6	Paso 7		Paso 8
CF_i	E'_i	N'_i	T'_i	Z_i	X'_i	D_i	L_i	K_i	A_i	I_iA_i
250	57,5	57,5	-1,7	57,5	-5,6	57,5	0,9	0,5	0,5	0,03
500	59,5	54,5	-1,7	54,5	-11,4	54,5	0,9	0,7	0,6	0,1
1.000	61,5	51,5	-1,7	51,5	-14,2	51,5	0,8	0,8	0,7	0,17
2.000	58,5	48,5	-1,7	48,5	-19,4	48,5	0,8	0,8	0,7	0,18
4.000	55,5	45,5	-1,7	45,5	-27,6	45,5	0,8	0,8	0,65	0,14
8.000	52,5	42,5	-1,7	42,5	-8,8	42,5	0,7	0,8	0,6	0,03
										SII=0,0644

El resultado ($SII = 64,4\%$) indica que el sistema de PA sería aceptable para oyentes con una audición normal. No obstante, esta predicción debería comprobarse escuchando el sistema. Además hay que tener en cuenta que en este caso, a diferencia de lo que ocurría en los problemas anteriores, la inteligibilidad del mensaje no está facilitada por la información visual que el oyente pueda obtener de la fuente de sonido.

4.7 Los trabajadores de una oficina han manifestado su malestar por el nivel de ruido presente en su lugar de trabajo. Las principales fuentes de ruido detectadas son: el tráfico rodado, los aparatos de aire acondicionado, los teléfonos, las impresoras y las conversaciones de los compañeros.

Tras realizar mediciones del nivel de presión sonora «L» en la oficina, se ha obtenido un L_{10} de 59 dB y un L_{90} de 49 dB.

Valorar el confort acústico en esta oficina de acuerdo con el Índice de Ruido en Oficinas (IRO) indicando el porcentaje de insatisfechos.

SOLUCIÓN

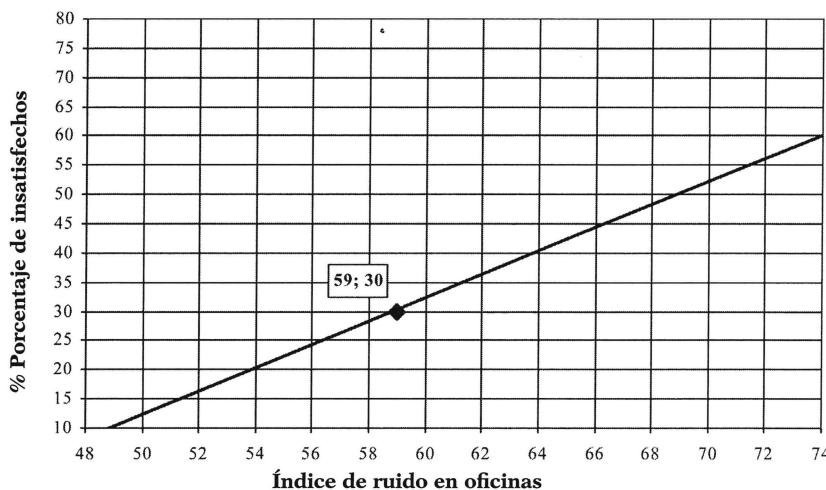
El porcentaje de insatisfechos se puede obtener a partir de los valores de la tabla o gráficamente partiendo del valor del IRO:

- A partir de la tabla:

L_{10} (dBA)	$(L_{10} - L_{90})$ (dBA)								
	7	8	9	10	11	12	13	14	15
55	14	17	20	22	25	28	31	34	37
56	16	19	22	24	27	30	33	36	39
57	18	21	23	26	29	32	35	38	40
58	20	23	25	28	31	34	37	40	42
59	22	25	27	30	33	36	39	42	44
60	24	27	29	32	35	38	41	44	46
61	26	29	31	34	37	40	43	46	48
62	28	30	33	36	39	42	45	47	50
63	30	32	35	38	41	44	47	49	52
64	32	34	37	40	43	46	49	51	54
65	34	36	39	42	45	48	51	53	56

Teniendo en cuenta que el L_{10} es de 59 dB y que $(L_{10} - L_{90})$ es de 10 dB, el porcentaje de insatisfechos es del 30%.

- A partir del cálculo del índice IRO y del gráfico:



El índice IRO se obtiene de la siguiente ecuación:

$$IRO = L_{90} + 2,4 \cdot (L_{90} - L_{10}) - 14$$

$$IRO = 49 + 2,4 \cdot (59 - 49) - 14 = 59$$

4.8 En una oficina con un nivel de ocupación alto, circulación de público, conversaciones a distancia, teléfonos, impresoras y ruido de tráfico proveniente del exterior, el valor del nivel equivalente ponderado A, durante dos horas de trabajo, es de $L_{Aeq,2\text{ horas}} = 68 \text{ dB(A)}$. Los empleados manifiestan una gran molestia por las continuas oscilaciones del nivel de presión sonora. Las mediciones registradas en la oficina dieron como resultado un L_{10} de 74 dB(A) y un L_{90} de 53 dB(A).

Valorar el ruido de esta oficina empleando el índice IRO y, si es necesario, proponer medidas para disminuir el porcentaje de insatisfechos.

SOLUCIÓN

Aplicando la expresión que permite obtener el IRO:

$$IRO = L_{90} + 2,4 \cdot (L_{90} - L_{10}) - 14$$

$$IRO = 53 + 2,4 \cdot (74 - 53) - 14 = 89$$

El índice IRO es en este caso muy alto, motivado sobre todo por el valor de L_{10} , que indica que el nivel de ruido ha sido superior a 74 dB(A) durante el 10% del tiempo de medición, es decir, se alcanzan altos niveles de presión sonora de forma inesperada que, al ser de corta duración, computan poco en el valor medio, pero que son la causa fundamental del malestar.

Probablemente un mayor coeficiente de aislamiento de los materiales que forman las paredes exteriores rebajaría los valores máximos de ruido y, por lo tanto, el L_{10} . El ambiente sonoro podría mejorar sustancialmente si se rebajan los valores máximos. Para ello sería preciso el análisis de las fuentes de ruido que generan dichos valores y la aplicación de medidas correctoras que permitieran reducirlos. Por ejemplo, si se consiguiera rebajar el valor de L_{10} a 59 dB(A), se conseguiría reducir el índice de IRO hasta valores de 53-54 dB(A), con lo que el porcentaje de insatisfechos esperable sería razonable.

4.9 Los trabajadores de unas oficinas abiertas se quejan del ruido ocasionado por el aire turbulento que circula a través de las tuberías del sistema de climatización instalado en el techo.

El espectro sonoro que caracteriza esta situación aparece en la siguiente tabla:

Frec. (Hz)	16	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000
L dB(A)	78	80	73	60	55	45	39	35	27

- Determinar la curva de referencia de RC apropiada
- Asignar una calidad sonora subjetiva calculando el Índice de Evaluación de Calidad (QAI)
- Interpretar el valor del ambiente sonoro con el procedimiento RC Mark II

SOLUCIÓN

- a)** El promedio aritmético de los niveles sonoros en el rango principal de frecuencia conversacional, representada por los niveles en bandas de octava de 500, 1000 y 2000 Hz, es:

$$\bar{L} = \frac{1}{3} \sum L_i$$

$$\bar{L} = \frac{(45 + 39 + 35)}{3} = 39,7$$

Aproximando el valor obtenido al número entero más cercano, obtenemos que la curva de referencia para evaluar la calidad del espectro corresponde a RC 40.

- b)** Para obtener el QAI se deben seguir varios pasos:

- Obtener el espectro sonoro que caracteriza a la curva de referencia.
- Calcular las diferencias aritméticas de nivel de presión sonora entre el espectro que está siendo evaluado y la curva de referencia de RC en cada banda de frecuencia (ΔL).

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

Frec. (Hz)	16	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000
L dB(A)	78	80	73	60	55	45	39	35	27
L_{RC 40} dB(A)	65	65	60	55	50	45	40 ^{**}	35	30
ΔL	13	15	13	5	5	0	-1	0	-3

3) Calcular las desviaciones medias de energía espetrales de la curva de referencia de RC en cada uno de los tres grupos de frecuencia aplicando las ecuaciones siguientes:

- Región LF (16-63 Hz)

$$\Delta LF = 10 \cdot \lg \left[\frac{(10_{16}^{0,1 \Delta L} + 10_{31,5}^{0,1 \Delta L} + 10_{63}^{0,1 \Delta L})}{3} \right]$$

$$\Delta LF = 10 \cdot \lg \left[\frac{(10^{1,3} + 10^{1,5} + 10^{1,3})}{3} \right] = 13,7 \text{ dB(A)}$$

- Región MF (125-500 Hz)

$$\Delta MF = 10 \cdot \lg \left[\frac{(10_{125}^{0,1 \Delta L} + 10_{250}^{0,1 \Delta L} + 10_{500}^{0,1 \Delta L})}{3} \right]$$

$$\Delta MF = 10 \cdot \lg \left[\frac{(10^{0,5} + 10^{0,5} + 10^0)}{3} \right] = 3,8 \text{ dB(A)}$$

- Región HF (1.000-4.000 Hz)

$$\Delta HF = 10 \cdot \lg \left[\frac{(10_{1.000}^{0,1 \Delta L} + 10_{2.000}^{0,1 \Delta L} + 10_{4.000}^{0,1 \Delta L})}{3} \right]$$

$$\Delta HF = 10 \cdot \lg \left[\frac{(10^{-0,1} + 10^0 + 10^{-0,3})}{3} \right] = -1,2 \text{ dB(A)}$$

En el caso de ΔLF y ΔHF , como las diferencias de las desviaciones no superan los 3 dB, sería suficiente realizar un promedio aritmético del siguiente modo:

$$\Delta LF = \frac{(13 + 15 + 13)}{3} = 13,6 \text{ dB(A)}$$

$$\Delta HF = \frac{[-1 + 0 + (-3)]}{3} = -1,3 \text{ dB(A)}$$

4) Obtención del QAI a partir de la diferencia aritmética entre los valores más altos y más bajos de los factores de desviación espetrales:

$$QAI = 13,7 - (-1,2) = 14,9 \text{ dB(A)}$$

- c) Puesto que el QAI es mayor que 5 dB(A), al espectro se le da la valoración del rango de frecuencias que tiene el factor de desviación con el valor positivo más alto, es decir, LF (frecuencia baja dominante), por lo que los ocupantes de las oficinas deberían percibir el ruido ambiente como un estruendo. Además, estos niveles de presión sonora de baja frecuencia se extienden en la región A de las curvas RC (ver figura 1). En esta región, la vibración acústicamente inducida puede ser percibida claramente y es capaz de causar traqueteos auditivos en aparatos de iluminación, muebles, puertas, ventanas, etc. En conclusión, la valoración RC Mark II de este espectro es de RC 40 (LFV_A).

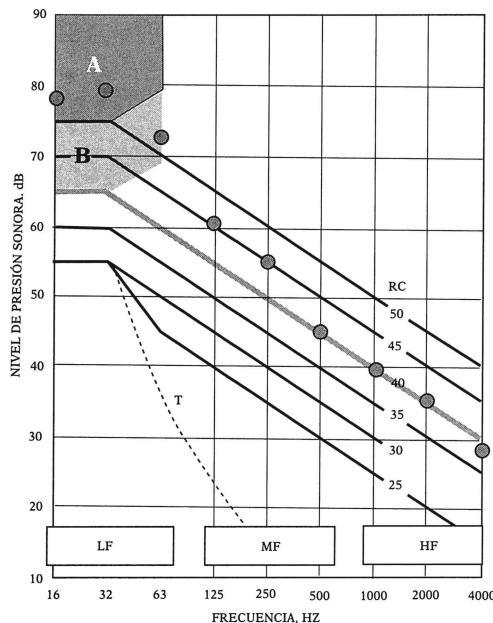


Figura 1. Representación gráfica del espectro sonoro de unas oficinas abiertas y de la familia de curvas RC revisadas

Por otra parte, puesto que el QAI excede los 10 dB(A), la situación sonora probablemente será juzgada como inaceptable por la mayor parte de los trabajadores (ver tabla 9 del Apéndice I), siendo éste el resultado de la evaluación.

4.10 En un aula de 60 m² se llevaron a cabo mediciones de los niveles de presión sonora (L_p) en bandas de octava y se obtuvieron los valores que se muestran a continuación:

Frec. (Hz)	16	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000
L _p dB(A)	61	71	61	56	54	50	44	43	39

Evaluar la idoneidad de esta aula como lugar para impartir una clase típica aplicando el procedimiento del RC Mark II.

SOLUCIÓN

Siguiendo los pasos del ejercicio anterior:

- 1) Promedio aritmético de los niveles sonoros en las bandas de octava de 500, 1.000 y 2.000 Hz:

$$\bar{L} = \frac{1}{3} \sum L_i$$

$$\bar{L} = \frac{(50 + 44 + 43)}{3} = 45,7$$

Aproximando el valor obtenido al número entero más cercano (46), obtenemos que la curva de referencia para evaluar la calidad del espectro corresponde a RC 46.

- 2) Cálculo de las diferencias aritméticas de nivel de presión sonora entre el espectro evaluado y la curva RC 46:

Frec. (Hz)	16	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000
L dB(A)	61	71	61	56	54	50	44	43	39
L_{RC 46} dB(A)	71	71	66	61	56	51	46	41	36
ΔL	-10	0	-5	-5	-2	-1	-2	2	3

- 3) Cálculo de las desviaciones medias de energía espectrales de la curva RC 46 en cada uno de los tres grupos de frecuencia:

- Región LF (16-63 Hz)

$$\Delta LF = 10 \cdot \lg \left[\frac{(10^{0,1 \Delta L}_{16} + 10^{0,1 \Delta L}_{31,5} + 10^{0,1 \Delta L}_{63})}{3} \right]$$

$$\Delta LF = 10 \cdot \lg \left[\frac{(10^{-1} + 10^0 + 10^{-0,5})}{3} \right] = -3,3 \text{ dB(A)}$$

- Región MF (125-500 Hz)

$$\Delta MF = 10 \cdot \lg \left[\frac{(10^{0,1 \Delta L}_{125} + 10^{0,1 \Delta L}_{250} + 10^{0,1 \Delta L}_{500})}{3} \right]$$

$$\Delta MF = 10 \cdot \lg \left[\frac{(10^{-0,5} + 10^{-0,2} + 10^{-0,1})}{3} \right] = -2,4 \text{ dB(A)}$$

- Región HF (1.000-4.000 Hz)

$$\Delta HF = 10 \cdot \lg \left[\frac{\left(10_{1.000}^{0.1 \Delta L} + 10_{2.000}^{0.1 \Delta L} + 10_{4.000}^{0.1 \Delta L} \right)}{3} \right]$$

$$\Delta HF = 10 \cdot \lg \left[\frac{\left(10^{-0.2} + 10^{0.2} + 10^{0.3} \right)}{3} \right] = 1,5 \text{ dB(A)}$$

4) Obtención del QAI a partir de la diferencia aritmética entre los valores más altos y más bajos de los factores de desviación espectrales:

$$QAI = 1,5 - (-3,3) = 4,8 \text{ dB(A)}$$

El QAI es inferior a 5 dB(A), pero el nivel de presión sonora en la banda de octava de 31,5 Hz excede los 65 dB (región B de las curvas RC), por lo que tiene una fuerza suficiente para crear problemas adicionales por una posible vibración acústicamente inducida en paredes y techos de peso ligero. Puesto que $QAI < 5 \text{ dB}$ y $65 < L_{31,5} < 75 \text{ dB}$, de acuerdo con la tabla 9 del Apéndice I, la calidad sonora se puede describir como LFV_B (estrondo, con vibración superficial moderadamente perceptible en el local), de forma que la mayoría de los ocupantes del aula juzgarán la situación sonora como moderada.

4.11 Aplicar las curvas Noise Rating (NR) para evaluar los espectros de frecuencia del ruido medidos en las situaciones planteadas en el problema 4.10.

Frec. (Hz)	16	31,5	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000
$L_{AULA} \text{ dB(A)}$	61	71	61	56	54	50	44	43	39

SOLUCIÓN

Se procede situando el espectrograma de ruido sobre la representación gráfica de las curvas NR (figura 2). La curva de referencia será la que quede tangente justo por encima del espectrograma a evaluar.

La interpretación del resultado se obtiene a partir de las indicaciones contenidas en la tabla siguiente, en la que, a diferentes actividades y/o ambientes, se asigna el correspondiente intervalo de curvas NR que permiten decidir si el ruido existente en un espacio es aceptable o no para el uso previsto.

Tal y como se muestra en el gráfico (figura 3), la mayor penetración de los datos del espectrograma en las curvas NR se da a 500 Hz. A esta frecuencia el nivel de presión sonora está ligeramente por encima de la curva NR 45. Por tanto la curva

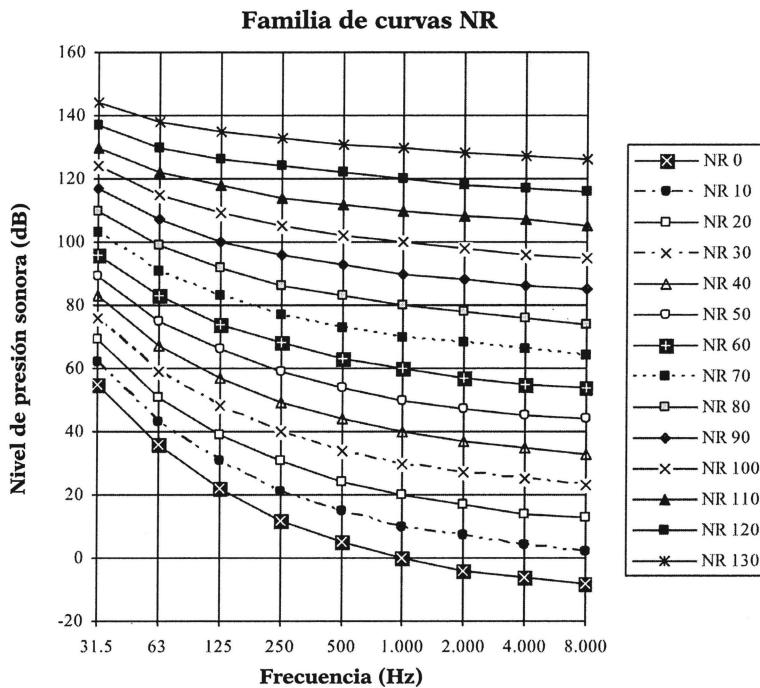


Figura 2. Representación de la familia de curvas NR

Aplicación	Intervalo de curvas NR aceptables
Oficinas	50-55
Gimnasios, salas de deporte	40-50
Restaurantes, bares, cafeterías	35-45
Despachos, bibliotecas	30-40
Hospitales, salas pequeñas de conferencias	25-35
Aulas, salas grandes de conferencias	20-30

Criterios de aceptabilidad de las curvas NR

NR de referencia en este caso correspondería a la NR 46, lo que de acuerdo con los criterios de aceptabilidad supone un nivel sonoro excesivo para un aula.

Es importante tener en cuenta que la curva NR de referencia de un conjunto de datos se obtiene observando la penetración más lejana en las curvas NR mediante una línea perpendicular a cada curva, y no a partir del valor más alto de L_p que se haya medido. En este ejemplo, el valor de L_p medido a 250 Hz es mayor que el

medido a 500 Hz, pero este último valor coincide exactamente con la curva NR 45 mientras que el valor medido a 500 Hz sobrepasa la curva NR 45.

Nota: En este problema los datos se han evaluado en base a incrementos de 1 dB, pero de forma subjetiva una persona no puede detectar diferencias tan pequeñas de nivel sonoro.

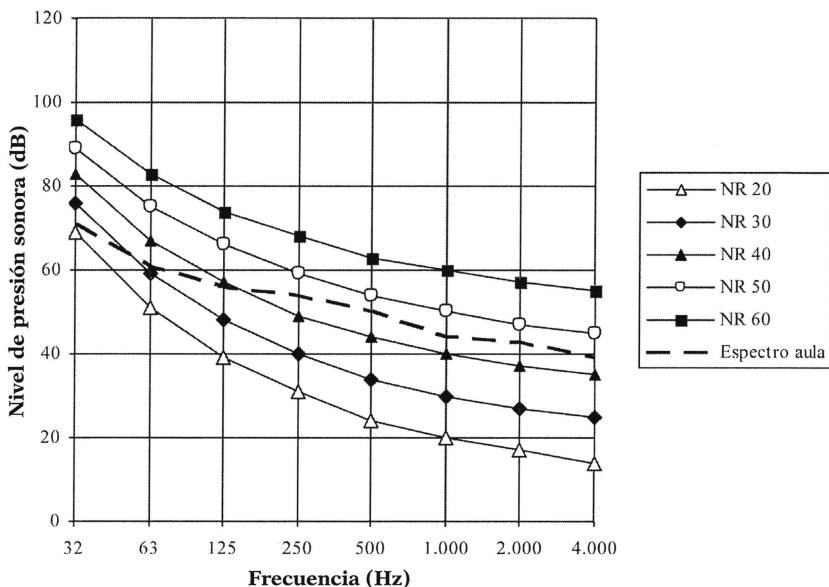


Figura 3. Representación del espectro del aula y de la familia de curvas NR

4.12 En un centro docente que ocupa un edificio construido en 1981 los alumnos se quejan frecuentemente porque el sistema de aire acondicionado de una de las aulas no les permite escuchar las explicaciones del profesor.

La medición de los niveles de presión sonora en bandas de octava, depara el siguiente espectro de frecuencias:

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
L_{eq} (dB)	68	60	55	50	45	45	40	30

¿Están justificadas las quejas de los alumnos de acuerdo con las recomendaciones establecidas en el Documento Básico de Protección frente al Ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación?

SOLUCIÓN

En primer lugar, se debe calcular a partir del espectro de frecuencias en bandas de octava, el nivel de presión sonora ponderado A:

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
L_{eq} dB	68	60	50	45	40	38	30	30
Ponderación A	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	+0	+1,2	+1	-1,1
L_{Ai} dB(A)	41,8	43,9	41,4	41,8	40	39,2	31	28,9

Sumando los niveles resultantes de cada octava:

$$L_A = 10 \cdot \lg \left[\sum_i 10^{L_{A_i}/10} \right]$$

$$L_A = 10 \cdot \lg \left[10^{4,18} + 10^{4,39} + 10^{4,14} + 10^{4,18} + 10^4 + 10^{3,92} + 10^{3,9} + 10^{2,89} \right]$$

$$L_A = 49,49 \text{ dB(A)} \approx 50 \text{ dB(A)}$$

Puesto que el ruido proviene fundamentalmente del aire acondicionado, se puede suponer que es de tipo estable, de forma que el nivel hallado ($L_{p,A}$) es muy parecido al nivel equivalente que se obtendría por medición ($L_{Aeq,T}$):

$$L_A \approx L_{Aeq,T} = 50 \text{ dB(A)}$$

El valor recomendado en la Norma Básica de la Edificación NBE-CA-88 para aulas de edificios de uso docente es de 40 dB(A), nivel bastante inferior al existente en el aula del problema planteado. Es de esperar que existan molestias por el ruido y las consiguientes quejas de los alumnos.

4.13 La cinta transportadora de una industria papelera está dotada de una señal de alarma que se activa cuando la cinta se pone en marcha. Se han medido los niveles de ruido de fondo existentes en la nave (L_N) y las señales acústicas emitidas por la cinta (L_s), tanto en banda ancha como en banda de octava y en banda de tercio de octava. Los resultados de las mediciones se muestran en las tablas siguientes:

Banda ancha

L_s (dBA)	97,3
L_N (dBA)	83

Banda de octava

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000
L_{s, oct} (dB)	65,5	69,2	81,9	85,1	89,9	94,7	82,7	82,1	75
L_{N, oct} (dB)	65,5	69,2	81,9	85,1	66,1	63,2	56,9	49,4	40,6

Banda de un tercio de octava

Frec. (Hz)	63	80	100	125	160	200	250	315	400
$L_{S, \text{oct}}$ (dB)	60,1	61,3	62,6	66	64,5	79,5	79,9	70,8	81,4
$L_{N, \text{oct}}$ (dB)	60,1	61,3	62,6	66	64,5	77,7	79,9	57,6	81,4

Frec. (Hz)	500	630	800	1.000	1.250	1.600	2.000	2.500
$L_{S, \text{oct}}$ (dB)	82,5	81,4	78,2	83,1	88,5	93,2	88	83,3
$L_{N, \text{oct}}$ (dB)	82,5	69,9	59,4	60,9	58,7	58,7	60,1	54,9

Frec. (Hz)	3.150	4.000	5.000	6.300	8.000	10.000	12.500	16.000
$L_{S, \text{oct}}$ (dB)	78,6	78,5	76,3	77,3	77,6	77,5	72,6	70,7
$L_{N, \text{oct}}$ (dB)	53,9	51,8	49,9	46,7	44,5	40,5	37,9	34,5

Calcular el nivel de enmascaramiento tanto en bandas de octava como en bandas de tercio de octava y evaluar la audibilidad de la señal en base a los criterios establecidos en la norma UNE-EN-457:1992 (Seguridad de las máquinas. Señales audibles de peligro).

SOLUCIÓN

Análisis por banda ancha

I. Se deben cumplir dos condiciones:

El nivel ponderado A de la señal no debe ser inferior a 65 dB para asegurar su audibilidad entre la población afectada con capacidad auditiva normal o con ligera hipoacusia.

$$L_S [\text{dB(A)}] \geq 65 \text{ dB}$$

$$97 \geq 65 \text{ dB}$$

II. La señal debe superar claramente el umbral de enmascaramiento. Esto suele lograrse si el nivel ponderado A de la señal sobrepasa el nivel de ruido ambiente al menos en 15 dB.

$$L_S - L_N (\text{dB}) \geq 15 \text{ dB}$$

$$97 - 83 = 14 < 15 \text{ dB}$$

Puesto que esta segunda condición no se cumple, es necesario obtener predicciones más precisas mediante análisis por banda de octava o por banda de un tercio de octava.

Análisis por bandas de octava

El umbral de enmascaramiento en cada una de las bandas de octava ($L_{T_{1, \text{oct}}}$) se puede determinar a partir de los niveles por banda de octava del ruido de fondo ($L_{N_{n, \text{oct}}}$) a partir del siguiente procedimiento:

Paso 1: En la banda de octava más baja ($n = 1$)

$$L_{T_{1, \text{oct}}} = L_{N_{1, \text{oct}}}$$

Paso 2: ($n > 1$)

$$L_{T_{n, \text{oct}}} = \max (L_{N_{n, \text{oct}}}; L_{T_{n-1, \text{oct}}} - 7,5 \text{ dB})$$

Se debe cumplir (además de la condición I) la siguiente ecuación en al menos una banda de octava dentro del rango de frecuencias entre 300 y 3.000 Hz (condición III):

$$L_s - L_T \text{ (dB)} \geq 10 \text{ dB}$$

La siguiente tabla muestra la aplicación del análisis anterior a los datos obtenidos a partir de las mediciones:

Frec. (Hz)	L_s (dB)	L_N (dB)	L_T (dB)	$L_s - L_T$ (dB)	$\geq 10 \text{ dB}$
63	66	66	66	0	No
125	69	69	69	0	No
250	82	82	82	0	No
500	85	85	85	0	No
1.000	90	66	77,5	12,5	Sí
2.000	95	63	70	25	Sí
4.000	83	57	62,5	20,5	Sí
8.000	82	49	55	27	Sí
16.000	75	41	47,5	27,5	Sí

Puesto que se cumple la condición III, se puede determinar que la señal cumple el requisito de audibilidad.

Análisis por bandas de tercio de octava

El umbral de enmascaramiento en cada una de las bandas de un tercio de octava ($L_{T_{1/3, \text{oct}}}$) se puede determinar a partir de los niveles por banda de un tercio de octava del ruido de fondo ($L_{N_{n, 1/3, \text{oct}}}$) a partir del siguiente procedimiento:

Paso 1: En la banda de un tercio de octava más baja ($n = 1$)

$$L_{T_{1, 1/3, \text{oct}}} = L_{N_{1, 1/3, \text{oct}}}$$

Paso 2: ($n > 1$)

$$L_{Tn, 1/3 \text{ oct}} = \max(L_{Nn, 1/3 \text{ oct}}; L_{Tn-1, 1/3 \text{ oct}} - 2,5 \text{ dB})$$

Se debe cumplir (además de la condición I) la siguiente ecuación en al menos una banda de un tercio de octava dentro del rango de frecuencias entre 300 y 3.000 Hz (condición IV):

$$L_s - L_T \text{ (dB)} \geq 13 \text{ dB}$$

La siguiente tabla muestra la aplicación del análisis anterior a los datos obtenidos a partir de las mediciones:

Frec. (Hz)	L_s (dB)	L_N (dB)	L_T (dB)	$L_s - L_T$ (dB)	≥ 13 dB
63	60	60	60	0	No
80	61	61	61	0	No
100	63	63	63	0	No
125	66	66	66	0	No
160	65	65	65	0	No
200	80	78	78	2	No
250	80	80	80	0	No
315	71	58	77,5	-6,5	No
400	81	81	81	0	No
500	83	83	83	0	No
630	81	70	80,5	0,5	No
800	78	59	78	0	No
1.000	83	61	75,5	7,5	No
1.250	89	59	73	16	Sí
1.600	93	59	70,5	22,5	Sí
2.000	88	60	68	20	Sí
2.500	83	55	65,5	17,5	Sí
3.150	79	54	63	16	Sí
4.000	79	52	60,5	18,5	Sí
5.000	76	50	58	18	Sí
6.300	77	47	55,5	21,5	Sí
8.000	78	45	53	25	Sí
10.000	78	41	50,5	27,5	Sí
12.500	73	38	48	25	Sí
16.000	71	35	45,5	25,5	Sí

Puesto que se cumple la condición IV, se puede determinar que la señal cumple el requisito de audibilidad.

4.14 Se desea saber si los trabajadores de una empresa del sector metal que utilizan protectores auditivos son capaces de reconocer la señal audible de peligro que indica el movimiento de un puente grúa. Se dispone de los datos siguientes:

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
$L_{S, \text{oct}}$ (dB)	70	70	90	97	94	95	87	68
$L_{N, \text{oct}}$ (dB)	79	89	100	88	86	83	81	78
d_{oct} (dB)	21	27	65	28	29	30	43	33

Donde d_{oct} corresponde al nivel medio de atenuación acústica por banda de octava del protector auditivo individual.

SOLUCIÓN

En primer lugar es necesario calcular el nivel efectivo por banda de octava de la señal audible de peligro ($L'_{S, \text{oct}}$) y del ruido ambiente ($L'_{N, \text{oct}}$) a partir del nivel medio de atenuación acústica del protector auditivo individual:

$$L'_{S, \text{oct}} = L_{S, \text{oct}} - d_{\text{oct}}$$

$$L'_{N, \text{oct}} = L_{N, \text{oct}} - d_{\text{oct}}$$

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
$L'_{S, \text{oct}}$ (dB)	49	43	25	69	65	65	44	35
$L'_{N, \text{oct}}$ (dB)	58	62	35	60	57	53	38	45

A partir de los datos anteriores es posible calcular el nivel por banda de octava del umbral de enmascaramiento con los protectores auditivos ($L'_{T, \text{oct}}$) y analizar la audibilidad de la señal por bandas de octava:

Frec. (Hz)	L'_s (dB)	L'_N (dB)	L'_T (dB)	$L'_s - L'_T$ (dB)	≥ 10 dB
63	70	79	79	-9	No
125	70	89	89	-19	No
250	90	100	100	-10	No
500	97	88	92,5	4,5	No
1.000	94	86	86	8	No
2.000	95	83	83	12	Sí
4.000	87	81	81	6	No
8.000	68	78	78	-10	No

El umbral de enmascaramiento $L'_{T_{\text{oct}}}$ se supera en 12 dB en la banda de octava centrada en 2.000 Hz. La señal audible puede ser fácilmente reconocida incluso llevando un protector auditivo individual.

4.15 Los músicos de una orquesta sinfónica actúan de jueves a domingo en el foso de un teatro durante 2,5 horas diarias. Además, los jueves ensayan una media de dos horas en el mismo foso. En el cuadro siguiente aparecen los resultados de las mediciones correspondientes a la exposición al ruido de los diferentes intérpretes:

Fuente del ruido	Nivel de presión sonora dB(A)	Nivel de presión sonora de pico dB(C)
Violín	88	104
Viola	87	102
Chelo	86	102
Contrabajo	86	98
Trompeta	93	113
Trombón	90	109
Trompa	91	107
Flautín/flauta	90	111
Clarinete	88	110
Fagot	87	109
Percusión	87	110
Director de orquesta	83	94

Evaluar la exposición al ruido de los músicos y, en caso necesario, proponer medidas que permitan evitar o reducir la exposición.

SOLUCIÓN

El nivel de exposición diaria de cada uno de los integrantes de la orquesta puede obtenerse a partir de la siguiente expresión:

$$L_{\text{Aeq,d}} = L_{\text{Aeq,T}} + 10 \cdot \lg \frac{T}{8}$$

Siendo T: el tiempo de exposición al ruido. En este caso varía en función del día de la semana, dependiendo si los intérpretes tienen ensayo o no.

Fuente del ruido	Nivel de exposición diario equivalente dB(A)	
	Sólo actuación (2,5 h)	Actuación + ensayo (4,5 h)
Violín	83	86
Viola	82	85
Chelo	81	84
Contrabajo	81	84
Trompeta	88	91
Trombón	85	88
Trompa	86	89
Flautín/flauta	85	88
Clarinete	83	86
Fagot	82	85
Percusión	82	85
Director de orquesta	78	81

Puesto que la exposición varía en función de la jornada laboral existe la posibilidad de realizar la evaluación utilizando el nivel de exposición semanal en lugar del diario, a partir de la siguiente expresión:

$$L_{Aeq,s} = 10 \cdot \lg \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{i=m} 10^{0,1L_{Aeq,di}}$$

Durante dos días a la semana el tiempo de exposición es de 2,5 horas diarias. Los dos días restantes la exposición es de 4,5 horas al día.

Fuente del ruido	Nivel de exposición semanal equivalente dB(A)
Violín	84
Viola	83
Chelo	82
Contrabajo	82
Trompeta	89
Trombón	86
Trompa	87
Flautín/flauta	86
Clarinete	84
Fagot	83
Percusión	83
Director de orquesta	79

En el caso de la trompeta no es posible realizar una evaluación semanal porque el nivel de exposición semanal supera el valor límite de exposición de 87 dB(A).

En cuanto al resto de instrumentos, en ningún caso se alcanza el nivel de presión sonora de pico de 135 dB(C), correspondiente al valor inferior de exposición que da lugar a una acción.

Las medidas a adoptar dependerán de cuál sea el nivel de exposición semanal equivalente:

- El director de orquesta está expuesto a un riesgo aceptable.
- Los intérpretes de trombón, trompa, flautín y flauta están expuestos a niveles que superan el valor superior de exposición que da lugar a una acción. En estos casos se debe establecer un programa de medidas técnicas y/o de organización y es obligatorio que los músicos utilicen equipos de protección auditiva, tanto durante la actuación como durante los ensayos. Los protectores más adecuados para este tipo de intérpretes son los tapones moldeados a medida.
- El resto de intérpretes están expuestos a niveles situados entre 80 dB(A) y 85 dB(A), por lo que se les deben entregar equipos de protección auditiva.

Algunas de las medidas que podrían adoptarse para reducir la exposición son las siguientes:

- Añadir materiales que absorban el sonido. Se puede considerar, por ejemplo, la instalación de pantallas absorbentes entre las diferentes secciones.
- Ensayar fuera del foso, en espacios más abiertos que permitan la difusión del sonido.
- Garantizar una altura mínima de 2,5 m desde el suelo hasta el techo.
- Asegurarse de la correcta colocación de los intérpretes:
- Aumentar al máximo el espacio entre los intérpretes. Se debería garantizar un espacio mínimo de 1,7 m² por músico.
- Situar los instrumentos o secciones que producen un sonido más fuerte en las zonas delanteras y no techadas de forma que su sonido se difunda sin dificultad.
- Organizar diversos modos de rotación de los intérpretes y su ubicación en el foso para conseguir una reducción de los niveles de exposición individuales.

4.16 Un disc-jockey trabaja de jueves a sábado pinchando en una discoteca durante 6 horas diarias. Las mediciones han indicado un nivel de presión sonora de 97 dB(A) y un nivel de presión sonora de pico de 135 dB(C).

- a) Determinar el nivel de exposición diario equivalente en este puesto de trabajo.
- b) Estimar el nivel de exposición diario equivalente cuando el DJ utiliza orejeras a partir de los datos siguientes:

Frec. (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	GLOBAL
L_A	82	87	89	93	91	87	84	97 dB(A)
APV_f	17,7	17,5	14,2	12,7	22,7	31,0	30,9	

- c) Determinar el nivel diario equivalente ponderado A en el oído si el DJ utiliza el protector auditivo durante las 6 horas de exposición.
- d) A menudo el DJ se retira uno de los casquetes de las orejeras para tener una mejor percepción del sonido ambiental, por lo que el tiempo real de uso del protector en ambos oídos se reduce a 45 minutos de cada hora. ¿Cuál es el nivel diario equivalente ponderado A en el oído en este caso?

SOLUCIÓN

- a) Aplicando la fórmula que permite hallar el nivel de exposición diaria:

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \cdot \lg \frac{T}{8}$$

$$L_{Aeq,d} = 97 + 10 \cdot \lg \frac{6}{8}$$

$$L_{Aeq,d} = 95,8 \text{ dB(A)} \approx 96 \text{ dB(A)}$$

- b) El nivel de presión sonora efectivo ponderado A (L'_A) se obtiene a partir de la suma logarítmica de los valores de nivel de presión sonora ponderado A por banda de octava:

Frecuencia	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	GLOBAL
L_A	82	87	89	93	91	87	84	97 dB(A)
APV_f	26,7	26,5	26,2	26,7	30,7	31,0	31,9	
L'_A	55,3	60,5	62,8	66,3	60,3	56	52,1	70 dB(A)

$$L'_A = 10 \cdot \lg \left(\sum_{f=125 \text{ Hz}}^{f=8.000 \text{ Hz}} 10^{0,1 \cdot L'_{pAf}} \right)$$

$$L'_A = 10 \cdot \lg (10^{5,53} + 10^{6,05} + 10^{6,28} + 10^{6,63} + 10^{6,03} + 10^{5,6} + 10^{5,21})$$

$$L'_A = 69,7 \text{ dB(A)} \approx 70 \text{ dB(A)}$$

- c) Aplicando la fórmula que permite hallar el nivel de exposición diaria:

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \cdot \lg \frac{T}{8}$$

$$L_{Aeq,d} = 70 + 10 \cdot \lg \frac{6}{8}$$

$$L_{Aeq,d} = 68,8 \text{ dB(A)} \approx 69 \text{ dB(A)}$$

- d) El nivel equivalente diario supuesto en el oído si el DJ sólo utiliza ambas orejeras durante 4,5 de las 6 horas de exposición será:

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{i=m} T_i 10^{0,1 L_{Aeq,T_i}}$$

$$L_{Aeq,d} = 10 \cdot \lg \frac{1}{8} [4,5 \cdot 10^7 + 1,5 \cdot 10^{9,7}]$$

$$L_{Aeq,d} = 89,7 \text{ dB(A)} \approx 90 \text{ dB(A)}$$

Sería aconsejable que el DJ utilizara orejeras no pasivas, que incluyen un sistema para transmitir comunicaciones u otras señales (por ejemplo, la música en el caso de los disc-jockeys). Estos dispositivos reducen los niveles de ruido ambiental y, por lo tanto, permiten al usuario escuchar la música a un nivel inferior.

Otra opción es el uso de monitores intra-auditivos con altavoces/monitores en miniatura integrados que reciben una señal de sonido procedente de un transmisor – receptor. Se recomienda seleccionar aquellos que proporcionen protección auditiva individual frente a los ruidos ambientales, así como limitación del ruido comunicado electrónicamente.

5. REDUCCIÓN Y CONTROL DEL RUIDO

5.1. Una máquina emite una potencia acústica de 0,8 W en la octava de 2 kHz y tiene un coeficiente de directividad $Q = 2$. El local donde está situada es rectangular, con una base de 20 m x 30 m y 12 metros de altura. Los coeficientes de absorción a 2 kHz del techo, la pared y el suelo son, respectivamente: 0,7, 0,3 y 0,1.

Determinar la presión acústica en la banda de 2 kHz a 15 metros de la máquina.

SOLUCIÓN

Determinación de la potencia acústica:

$$L_W = 10 \cdot \lg \frac{W}{10^{-12}}$$

donde W es la potencia en vatios.

$$L_W = 119,03 \text{ dB}$$

Determinación de la constante del local.:

Superficie de paredes: $2 \cdot (20+30) \cdot 12 = 1.200 \text{ m}^2$

Superficie de suelo y techo: $20 \cdot 30 = 600 \text{ m}^2$

Superficie total: $1.200 + 600 + 600 = 2.400 \text{ m}^2$

Determinación de la superficie de absorción de cada paramento:

	S_i Superficie (m^2)	α_i Coef. de absorción	$\alpha_i \cdot S_i$
Pared	1.200	0,3	360
Techo	600	0,7	420
Suelo	600	0,1	60
Total	2.400	---	840

Determinación del coeficiente medio de absorción:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{\sum S_i}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{840}{2.400} = 0,35$$

Determinación de la constante del local, R:

$$R = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{1 - \bar{\alpha}}$$

$$R = \frac{840}{0,65} = 1.292$$

La presión acústica a una distancia r de la fuente de ruido vale:

$$L = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) = 95 \text{ dB}$$

5.2 En un almacén de 75 m x 45 m de planta y 25 metros de altura, los coeficientes de absorción a 1.000 Hz de las paredes, el suelo y el techo son, respectivamente: 0,1, 0,1 y 0,4. Una máquina que emite ruido por igual en todas direcciones produce una presión acústica (a 1.000 Hz) de 96 dB a 30 metros de la máquina. ¿Cuál será el nivel de ruido a 10 metros de la máquina?

SOLUCIÓN**Determinación de la constante del local:**

Superficie de paredes: $2 \cdot (45+75) \cdot 25 = 6.000 \text{ m}^2$

Superficie de suelo y techo: $45 \cdot 75 = 3.375 \text{ m}^2$

Superficie total: $6.000 + 3.375 + 3.375 = 12.750 \text{ m}^2$

Determinación de la superficie de absorción de cada paramento:

	S_i Superficie (m^2)	α_i Coef. de absorción	$\alpha_i \cdot S$
Pared	6.000	0,1	600
Techo	3.375	0,1	337,5
Suelo	3.375	0,4	1.350
Total	12.750	----	2.287,5

Determinación del coeficiente medio de absorción:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{\sum S_i} = \frac{2.287,5}{12.750} = 0,179$$

Determinación de la constante del local, R:

$$R = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{2.287,5}{0,821} = 2.787,6$$

El nivel de presión acústica a una distancia r de la fuente de ruido vale:

$$L = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) = 95 \text{ dB}$$

Y por tanto la diferencia de L_p , entre dos puntos situados respectivamente a distancias r_1 y r_2 de la fuente, valdrá:

$$L_1 - L_2 = 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4\pi r_1^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4\pi r_2^2} + \frac{4}{R} \right)$$

que para $r_1 = 30 \text{ m}$ y $r_2 = 10 \text{ m}$, con el valor obtenido de R y $Q=1$ puesto que el ruido es emitido por igual en todas direcciones, da:

$$L_1 - L_2 = -1,66 \text{ dB}$$

Es decir: a 10 metros de la máquina habrá 1,66 dB más que a 30 metros; por tanto, el nivel será:

$$96 + 1,66 = 97,66 \text{ dB} \approx 98 \text{ dB}$$

5.3 En un local de $30 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ de planta y 8 metros de altura hay una máquina cuyo espectro de potencia se da más abajo. Asimismo se indican los coeficientes de absorción de paredes, suelo y techo a las distintas frecuencias. Se plantea instalar una nueva máquina cuyo espectro de potencia se indica más abajo. El coeficiente de directividad vale 1 en ambos casos.

¿Qué aumento de la presión acústica en dB(A) se producirá en un puesto de trabajo situado a 20 metros de la primera máquina y a 15 metros de la segunda?

		Frecuencia (Hz)					
		125	250	500	1.000	2.000	4.000
Máquina antigua, niveles de potencia	125	68	80	90	105	100	95
	250						
Máquina nueva, niveles de potencia	125	73	85	95	110	105	100
	250						
Coeficientes de absorción	125	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Paredes	250						
Techo	500	0,08	0,07	0,09	0,12	0,14	0,17
Suelo	1.000	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
	2.000						
	4.000						

SOLUCIÓN

En primer lugar se calcula la superficie, el producto « $S \cdot \alpha$ » de cada paramento, el coeficiente medio de absorción y el valor de la constante del local, con las siguientes fórmulas:

Determinación del coeficiente medio de absorción:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{\sum S_i}$$

Determinación de la constante del local, R:

$$R = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{1 - \bar{\alpha}}$$

Superficie m ²		α·S					
		Frecuencia (Hz)					
		125	250	500	1.000	2.000	4.000
Paredes	2.400	240	120	144	168	216	192
Techo	1.500	120	105	135	180	210	255
Suelo	1.500	15	30	30	30	45	45
Total	5.400	375	255	309	378	471	492
Coeficiente de absorción medio		0,0694	0,0472	0,0572	0,07	0,0872	0,0911
Constante del local, R m²		402,99	267,64	327,75	406,45	516,01	541,32

La presión acústica a una distancia r de la fuente de ruido vale:

$$L_p = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

que para la máquina antigua da:

	Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Ruido producido por la máquina antigua a 10 m de ésta. (dB)	48,1	61,8	70,9	85,0	79,0	73,8

A partir de estos valores se calcula el nivel en dB(A):

	Frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	GLOBAL
L	48,1	61,8	70,9	85,0	79,0	73,8	86 dB
Filtro A	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	
L _A	32,0	53,2	67,7	85,0	80,2	74,8	87 dB(A)

La máquina antigua produce 87 dB(A).

Igualmente para la máquina nueva:

	Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Ruido producido por la máquina nueva a 15 m de ésta. (dB)	53,1	66,8	76,0	90,1	84,1	78,9

Y el resultado en dB(A):

	Frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	GLOBAL
L	53,1	66,8	76,0	90,1	84,1	78,9	91 dB
Filtro A	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	
L _A	37,0	58,2	72,8	90,1	85,3	79,9	92 dB(A)

La máquina nueva, *por sí sola*, producirá un ruido de 92 dB(A).

Al instalar la nueva máquina el nivel de ruido en dB(A) pasará a ser:

$$87 + 92 = 93,2 \text{ dB(A)}$$

y habrá aumentado en 6 dB(A) aproximadamente.

5.4 Supóngase que en el caso anterior se desea reducir el impacto acústico de la nueva máquina, para lo cual se instala a 30 metros del puesto de trabajo. ¿Cuál será la mejora lograda? ¿Cómo hubiera podido preverse este resultado?

SOLUCIÓN

A 30 metros, los cálculos efectuados con la misma fórmula anterior dan:

Frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Ruido producido por la máquina nueva. (dB)	53,0	66,8	75,9	90,0	83,9	78,7

La comparación de este espectro con el obtenido anteriormente ya muestra que las diferencias son mínimas, lo que se confirma al calcular el nivel en dB(A):

	Frecuencia (Hz)						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	GLOBAL
L	53,0	66,8	75,9	90,0	83,9	78,7	91 dB
Filtro A	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	
L _A	36,9	58,2	72,7	90,0	85,1	79,7	92 dB(A)

Obtenemos 92 dB(A), igual que antes. Si hubiéramos calculado el radio crítico hubiéramos visto que es del orden de 2 a 3 metros, y, por tanto, a distancias como las propuestas estamos dentro del campo reverberante y el nivel de ruido se mantiene prácticamente constante al aumentar la distancia.

El radio crítico vale:

$$r_c = 0,14\sqrt{Q \cdot R}$$

Donde Q es el coeficiente de directividad y R la constante del local.

Con los datos obtenidos para R y Q = 1 tendremos:

	Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Constante del local, R m ²	402,99	267,64	327,75	406,45	516,01	541,32
Distancia crítica, r _c m	2,8104	2,2904	2,5346	2,8225	3,1802	3,2573

5.5 En una cafetería se han detectado quejas de los clientes por el nivel de ruido. Se ha medido el tiempo de reverberación a 500 Hz resultando ser de 2 segundos, un valor claramente excesivo. Para reducirlo se instalan, suspendidos verticalmente del techo, cilindros de material absorbente (ver fotografía), con una longitud de 60 cm y un diámetro de 15 cm. Sus características absorbentes se indican más abajo. El local tiene una planta de 20 m x 10 m y una altura de 5 metros, siendo el volumen del local de 1.000 m³.



¿Cuántos de dichos cilindros será necesario instalar para que el tiempo de reverberación se reduzca a 1,5 segundos?

	Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Coeficiente de absorción	0,08	0,3	0,77	1	1	0,97

Las superficies del local son:

	Superficie, m ²
Paredes	300
Techo	200
Suelo	200
Total	700

SOLUCIÓN

La fórmula para el cálculo del tiempo de reverberación es la de Norris-Eyring:

$$T_R = \frac{0,161 \cdot V}{S \left[-\ln(1 - \bar{\alpha}) \right]}$$

Donde: V es el volumen del local en m³, S su superficie en m², y $\bar{\alpha}$ el coeficiente medio de absorción.

Como el tiempo de reverberación medido a 500 Hz es de 2 segundos, tendremos:

$$T_R = \frac{0,161 \cdot 1.000}{700 \left[-\ln(1 - \bar{\alpha}) \right]}$$

de donde despejando se obtiene que

$$\bar{\alpha} = 0,11$$

Por otra parte, como

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{\sum S_i}$$

sustituyendo los valores de $\bar{\alpha}$ y de $\sum S_i$ (que es la superficie total, que vale 700 m²) deducimos que $\sum \alpha_i \cdot S_i = 77$ m².

Supongamos que instalamos 50 cilindros. Cada uno de ellos tiene una superficie exterior de 0,283 m² y un volumen de 0,04 m³, según cálculos geométricos elementales.

Una vez instalados los cilindros, el nuevo valor del coeficiente medio de absorción $\bar{\alpha}_m$ valdrá:

$$\bar{\alpha} = \frac{77 + 50 \cdot 0,3 \cdot 0,77}{700 + 50 \cdot 0,3} = 0,124$$

Con lo que el nuevo tiempo de reverberación valdrá:

$$T_R = \frac{0,161 \cdot (1.000 - 50 \cdot 0,04)}{(700 + 50 \cdot 0,3) \cdot [-\ln(1 - 0,124)]} = 1,72$$

Es una reducción insuficiente. Si se repite el cálculo para una instalación de 100 cilindros se obtiene un tiempo de reverberación de 1,53 segundos, prácticamente igual a lo exigido.

5.6 Calcular a partir de qué frecuencia es válida la ley de la masa y cuál es la frecuencia crítica para una chapa de acero de grandes dimensiones y 1 cm de espesor, sabiendo que el módulo de Young del acero vale $200 \cdot 10^9$ Pascal, el coeficiente de Poisson 0,27, la densidad es 7.700 kg/m^3 y el producto de la masa superficial por la frecuencia crítica vale $99.700 \text{ Hz} \cdot \text{kg/m}^2$.

SOLUCIÓN

Si suponemos que la pared es de dimensión infinita, la primera frecuencia de resonancia, a partir de la cual empieza a regir la ley de la masa, viene dada por la expresión:

$$f_l = 0,4534 \cdot h \sqrt{\frac{E}{[\rho(1 - \sigma^2)]}}$$

donde: h es el espesor de la pared en metros, E el módulo de Young en Pascal, ρ la densidad del material en kg/m^3 y σ el coeficiente de Poisson.

Sustituyendo los valores en la fórmula anterior se obtiene:

$$f_l = 0,4534 \cdot 0,01 \sqrt{\frac{200 \cdot 10^9}{[7.700(1 - 0,27^2)]}} = 24 \text{ Hz}$$

Por debajo de esa frecuencia la ley de la masa no se cumple. Si se aplica, se obtienen valores del índice de aislamiento *inferiores* a los reales.

La masa superficial vale:

$$m_s = h \cdot \rho \quad m_s = 0,01 \cdot 7.700 = 77 \text{ kg/m}^2$$

Por tanto, la frecuencia crítica vale:

$$f_c = \frac{m_s \cdot f_l}{m_s} \quad f_c = \frac{99.700}{77} = 1.294 \text{ Hz}$$

5.7 ¿Qué espesor deberá tener una pared de hormigón para que atenúa 45 dB a 500 Hz? La densidad del hormigón es de 2.400 kg/m³, el producto de la masa superficial por la frecuencia crítica vale 50.200 Hz·kg/m² y el factor de pérdidas vale 0,02. Supóngase que la ley de la masa es aplicable a todas las frecuencias por debajo de la crítica, f_c .

SOLUCIÓN

Como el cálculo directo es complicado, deberemos tantear para diversos valores del espesor. Las fórmulas a emplear son:

$$\text{Si } f < f_c \quad IA = 20 \cdot \lg(f \cdot m_s) - 47,3 \quad (1)$$

$$\text{Si } f \geq f_c \quad IA = 20 \cdot \lg(f_c \cdot m_s) + 10 \lg \eta + 33,22 \cdot \lg\left(\frac{f}{f_c}\right) - 48 \quad (2)$$

Donde: IA es el índice de aislamiento en dB, f la frecuencia en Hz, m_s la masa superficial, η el factor de pérdidas y f_c la frecuencia crítica calculada tal como se ha visto en el problema anterior.

Supongamos un espesor de 0,1 m. La masa superficial valdrá:

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

La frecuencia crítica valdrá:

$$f_c = \frac{50.200}{240} = 209 \text{ Hz}$$

Como $500 > 209$, deberemos aplicar la fórmula (2) y tendremos:

$$IA = 20 \cdot \lg(209 \cdot 240) + 10 \cdot \lg(0,02) + 33,22 \cdot \lg\left(\frac{500}{209}\right) - 48 = 41,6 \text{ dB}$$

Para lograr una atenuación de 45 dB deberá adoptarse un espesor algo superior. Con 0,13 m, la masa superficial valdrá 312 kg/m² y la frecuencia crítica, 161 Hz. Aplicando la fórmula (2), puesto que $500 > 161$, tendremos:

$$IA = 20 \cdot \lg(161 \cdot 312) + 10 \cdot \lg(0,02) + 33,22 \cdot \lg\left(\frac{500}{161}\right) - 48 = 45,4 \text{ dB}$$

5.8 Con los mismos datos del problema anterior, hallar el espesor necesario para lograr que el índice de aislamiento sea de 40 dB a 250 Hz.

SOLUCIÓN

La mecánica del cálculo es la misma que la anterior, pero en este caso nos encontramos con que el índice de aislamiento no aumenta constantemente con el

espesor, debido al efecto de coincidencia, como se ve en la siguiente tabla, donde se resumen los resultados de los cálculos efectuados empleando las fórmulas del problema anterior:

Espesor m	Frecuencia crítica Hz	IA a 250 Hz dB
0,05	418	42,2
0,10	209	31,6
0,15	139	37,4
0,20	105	41,6
0,25	84	44,8

Un espesor de 5 cm sería suficiente para lograr el aislamiento requerido, pero, si por cualquier razón hubiera que construir una pared más gruesa, sería necesario un espesor de 20 cm para lograr un aislamiento de 40 dB a 250 Hz. Esta aparente paradoja se debe a que al aumentar el espesor disminuye la frecuencia crítica y en la zona de los 250 Hz se produce una disminución del aislamiento debido al efecto de coincidencia.

5.9 Representar gráficamente el índice de aislamiento de una pared de hormigón de 10 cm de espesor, entre 150 y 250 Hz. La densidad vale 2.400 kg/m^3 , el producto de la masa superficial por la frecuencia crítica $50.200 \text{ Hz}\cdot\text{kg/m}^2$ y el factor de pérdidas, 0,02.

SOLUCIÓN

La masa superficial valdrá:

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

La frecuencia crítica valdrá:

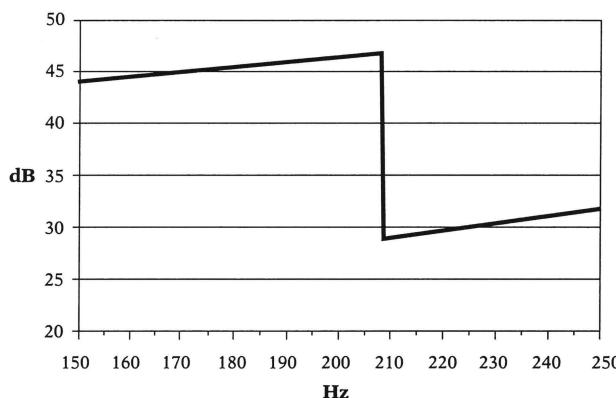
$$f_c = \frac{50.200}{240} = 209 \text{ Hz}$$

Las fórmulas a emplear son:

$$\text{Si } f < f_c \quad IA = 20 \cdot \lg(f \cdot m_s) - 47,3 \quad (1)$$

$$\text{Si } f \geq f_c \quad IA = 20 \cdot \lg(f_c \cdot m_s) + 10 \cdot \lg \eta + 33,22 \cdot \lg \left(\frac{f}{f_c} \right) - 48 \quad (2)$$

Cuya aplicación conduce al siguiente gráfico:



Obsérvese la brusca caída del aislamiento al llegar a la frecuencia crítica.

5.10 Sea una pared de 8 m x 3 m cuyo índice de aislamiento es de 40 dB. En dicha pared existe una puerta de 2 m x 1 m cuyo índice de aislamiento es el mismo que el de la pared pero que no ajusta perfectamente. El desajuste medio en todo su perímetro puede cifrarse en 0,5 cm.

- ¿Cuál será el índice de aislamiento del conjunto pared - puerta?
- ¿Cuál sería la pérdida de aislamiento si la pared tuviera un índice de aislamiento de 20 dB? Razona la diferencia entre ambos casos.

SOLUCIÓN

- a) El espacio libre dejado por la puerta vale:

$$S_1 = (2+1) \cdot 2 \cdot 0,005 = 0,03 \text{ m}^2$$

La superficie total de la pared, incluida la puerta, menos la rendija, será:

$$S_2 = 8 \cdot 3 - 0,03 = 23,97 \text{ m}^2$$

El aislamiento del conjunto vale:

$$IA = 10 \cdot \lg \frac{\sum S_i}{\sum \frac{IA_i}{10}}$$

En nuestro caso $IA_1 = 0$, pues se trata de aire, y $IA_2 = 40$, con lo que tendremos:

$$IA = 10 \cdot \lg \frac{24}{\frac{23,97}{10^{40/10}} + \frac{0,03}{10^{0/10}}} = 28,69 \text{ dB}$$

La rendija en la puerta hace que la puerta pierda más de 11 dB de aislamiento, es decir, deja pasar unas **dieciséis** veces más de energía sonora que si la puerta ajustara perfectamente.

- b)** Si el índice de aislamiento de la pared fuese de 20 dB, el nuevo índice de aislamiento valdría 19,5 dB, sin apenas variación.

La diferencia entre ambos casos ilustra el hecho de que un mismo tamaño de agujero causa mucho más “daño” al aislamiento de una pared bien aislada que al de una pared “débil”. Matemáticamente es fácil demostrar a partir de la fórmula anterior que, para una proporción de agujero dada, la pérdida de aislamiento es tanto mayor cuanto más alto es el aislamiento inicial de la pared.

- 5.11** La pared de separación entre la sala de motores y la sala de control de una fábrica está construida de ladrillo hueco de 15 cm de espesor y mide 15 m x 4 m de altura; dispone de una ventana de vidrio de 6 mm de espesor y de dimensiones 10 m x 2 m y de una puerta de acero de 2 mm de espesor, con una superficie de 4 m².

Calcular el índice de aislamiento global de esta separación.

En la tabla siguiente se incluyen los datos físicos necesarios (densidad y producto de la frecuencia crítica por la masa superficial) para el cálculo del índice de aislamiento de cada material; se indica también el valor calculado de la frecuencia crítica, que vale el producto de la frecuencia crítica por la masa superficial dividido por la masa superficial y la octava dentro de la cual se encuentra la frecuencia crítica.

Material	Densidad (kg·m ⁻³)	Espesor (m)	Masa superficial m _s (kg·m ⁻²)	Producto f _c ·m _s (Hz·m)	f _c (Hz)	Octava de f _c	Factor de pérdidas η
Ladrillo	750	0,15	112,5	31	258	250	0,015
Vidrio	2.500	0,006	15	15,2	2.020	2.000	0,01
Acero	7.700	0,002	15,4	12,5	6.250	8.000	0,001

SOLUCIÓN

Las fórmulas a emplear son:

$$\text{Si } f < f_c \quad IA = 20 \cdot \lg(f \cdot m_s) - 47,3 \quad (1)$$

$$\text{Si } f \geq f_c \quad IA = 20 \cdot \lg(f_c \cdot m_s) + 10 \cdot \lg \eta + 33,22 \cdot \lg \left(\frac{f}{f_c} \right) - 48 \quad (2)$$

Las fórmulas las aplicaremos a cada una de las frecuencias centrales de octava, utilizando la (1) para las octavas anteriores a aquélla en la cual se encuentra la frecuencia crítica y la (2) para las restantes. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Material	Superficie (m ²)	Índice de aislamiento							
		63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Ladrillo	36	29,7	35,7	23,5	33,5	43,5	53,5	63,5	73,5
Vidrio	20	12,2	18,2	24,2	30,2	36,2	12,6	22,6	32,6
Acero	4	12,4	18,4	24,4	30,4	36,5	42,5	48,5	36,2
	60								

El cálculo del índice de aislamiento global IA, para cada banda de frecuencias, de una pared compuesta de i partes con superficie S_i e índice de aislamiento IA_i se obtiene de la siguiente expresión:

$$IA = 10 \cdot \lg \frac{\sum S_i}{\sum \frac{S_i}{10^{IA_i/10}}}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos expresados en decibelios:

	Frecuencia (Hz)							
	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
IA	16,1	22,1	23,8	31,9	39,2	17,4	27,4	37,0

5.12 Una máquina ruidosa está situada en un local cuya superficie total es de 900 m² y cuyo coeficiente medio de absorción a 1.000 Hz es 0,05. El nivel de potencia de la máquina es 105 dB y su coeficiente de directividad vale 2. La máquina está situada a 4 metros de la pared que separa el taller del cuarto de control, cuya superficie total es de 100 m² y cuyo coeficiente medio de absorción a 1.000 Hz vale 0,35. El índice de aislamiento de la pared que separa ambos locales es, a 1.000 Hz, de 30 dB, y la superficie de la misma es de 16 m². Dentro del cuarto de control existe un puesto de trabajo situado a 1,5 metros de la pared de separación.

Determinar el nivel de presión acústica a 1.000 Hz en el puesto de trabajo del operador.

SOLUCIÓN

La constante del local vale:

$$R = \frac{\bar{\alpha} \cdot S}{1 - \bar{\alpha}}$$

siendo: S la superficie total y $\bar{\alpha}$ el coeficiente medio de absorción.

Luego, para el taller donde se encuentra la máquina la constante del local (R_T) vale:

$$R_T = \frac{0,05 \cdot 900}{1 - 0,05} = 47,37 \text{ m}^2$$

Análogamente, para la sala de control, tendremos:

$$R_C = \frac{0,35 \cdot 100}{1 - 0,35} = 53,85 \text{ m}^2$$

El nivel de presión acústica a una distancia r de una fuente de ruido vale:

$$L = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

Por tanto, junto a la pared de separación en el **lado del taller**, tendremos:

$$L_T = 105 + 10 \cdot \lg \left(\frac{2}{4 \cdot 3,14 \cdot 4^2} + \frac{4}{47,37} \right) = 94,7 \text{ dB}$$

Para calcular el nivel de presión acústica en el puesto de trabajo dentro de la sala de control debemos averiguar primero si éste se encuentra "cerca" o "lejos" de la pared. El criterio para ello es comparar el valor de dicha distancia « r » a la pared con el parámetro r^* :

$$r^* = \left(\frac{S_w}{2\pi} \right)^{1/2}$$

donde: S_w es la superficie de la pared.

Si r es inferior al valor del parámetro r^* , se considera que el punto está "cerca"; en caso contrario, está "lejos".

En nuestro caso:

$$r^* = \left(\frac{16}{2\pi} \right)^{1/2} = 1,6 \text{ m}$$

puesto que el operario está a 1,5 m consideraremos que está "cerca" de la pared.

En este caso el nivel de presión acústica viene dado por:

$$L = L_w - IA + 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{4 \cdot S_w}{R_C} \right) - 10 \cdot \lg (R_T)$$

Donde: L_p es el nivel de presión acústica en el punto considerado, L_w el nivel de potencia de la máquina, IA es el índice de aislamiento de la pared, en dB, R_T la constante del local donde se genera el ruido y R_C la constante del local hacia el cual se transmite el ruido.

$$L = 105 - 30 + 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{4 \cdot 16}{53,85} \right) - 10 \cdot \lg (47,37) = 61,6 \text{ dB}$$

5.13 Una máquina tiene un nivel de potencia acústica de 114 dB a 500 Hz y su coeficiente de directividad puede considerarse que vale 1. El local en el que se encuentra mide 20 x 20 x 4 metros y tiene un coeficiente medio de absorción a 500 Hz de 0,051. Un operario trabaja a 3 metros de la máquina. Se desea reducir su nivel de exposición encerrando la máquina en una cabina de 1,8 m x 1,2 m de base y 1 m de altura, en la que, a fin de permitir la introducción de materiales, se deberán practicar dos orificios de 0,2 m x 0,3 m. La cabina se fabricará con un material cuyo índice de aislamiento a 500 Hz es de 19 dB y se recubrirá interiormente con un material cuyo coeficiente de absorción a esa misma frecuencia es de 0,63.

Calcular la reducción de ruido lograda en el puesto de trabajo del operario.

SOLUCIÓN

Calcularemos en primer lugar el nivel de ruido percibido por el operario antes de colocar la cabina:

La superficie del local vale:

$$S = 2 \cdot (20 + 20) \cdot 4 + 2 \cdot 20 \cdot 20 = 1.120 \text{ m}^2$$

La constante del local a 500 Hz valdrá:

$$R = \frac{\bar{\alpha} \cdot S}{1 - \bar{\alpha}}$$

$$R = \frac{0,051 \cdot 1.120}{1 - 0,051} = 60,19 \text{ m}^2$$

Y en el puesto de trabajo del operario el nivel de presión acústica valdrá:

$$L = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$L_o = 114 + 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 3^2} + \frac{4}{60,19} \right) = 102,8 \text{ dB}$$

A continuación determinaremos si la cabina puede considerarse “grande” o “pequeña”.

Una cabina se considera **grande** si la expresión:

$$\frac{f \cdot V^{\frac{1}{3}}}{c} \geq 1 \quad (1)$$

Siendo: «f» la frecuencia del sonido, «V» el volumen de la cabina en m^3 y «c» la velocidad del sonido en m/s .

Una cabina se considera **pequeña** si la expresión:

$$\frac{L_{\max}}{\lambda} \leq 0,1$$

siendo $\lambda=c/f$

El volumen de la cabina que queremos construir es:

$$V = 1,8 \cdot 1,2 \cdot 1 = 2,16 \text{ m}^3$$

y la expresión (1), tomando 349 m/s como velocidad del sonido en el aire (corresponde a 30°C), valdrá:

$$\frac{500 \cdot 2,16^{\frac{1}{3}}}{349} = 1,85 > 1$$

Para 500 Hz la cabina puede considerarse "grande" por lo cual podremos calcular la pérdida por inserción (PI) con la fórmula:

$$PI = 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{\sum S_i \cdot \alpha_i}{\sum S_i \cdot 10^{-IA_i/10}} \right)$$

Donde: S_i son las superficies de los distintos elementos que componen la cabina y α_i y IA_i son sus respectivos coeficientes de absorción e índices de aislamiento.

Para el cálculo de $\sum S_i \alpha_i$ tendremos, teniendo en cuenta que los orificios tienen un coeficiente de absorción que es la unidad y que el suelo está totalmente cubierto por la máquina, con lo que no absorbe ruido:

$$\sum S_i \cdot \alpha_i = [2 \cdot (1,20 + 1,80) \cdot 1 + 1,20 \cdot 1,80 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,2] \cdot 0,63 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,21 \cdot 1 = 5,185 \text{ m}^2$$

Y para el cálculo de $\sum S_i \cdot 10^{-IA_i/10}$ tendremos:

$$\sum S_i \cdot 10^{-IA_i/10} = 8,04 \cdot 10^{-19/10} + 0,12 \cdot 10^0 = 0,22 \text{ m}^2$$

Donde se ha considerado que los agujeros tienen un índice de aislamiento cero, una hipótesis muy conservadora, pues según la ubicación de los orificios respecto al puesto de trabajo se suelen adoptar valores algo superiores (varios decibelios) del IA (Índice de Aislamiento). (Barron, p. 306). Y tendremos:

$$PI = 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{5,85}{0,22} \right) = 13,9 \text{ dB}$$

BIBLIOGRAFÍA

LEGISLACIÓN – GUÍAS TÉCNICAS

- Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.
- Guía técnica del REAL DECRETO 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido. INSHT.
- Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
- Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación y se modifica el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
- Real Decreto 1909/81, de 24 de julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE-CA-81 sobre Condiciones Acústicas en los edificios.
- Real Decreto 2115/1982, de 12 de agosto, por el que se modifica la Norma Básica de la Edificación NBE-CA-81, sobre condiciones acústicas en los edificios.
- Orden de 29 de septiembre de 1988 por la que se aclaran y corrigen diversos aspectos de los anexos a la Norma Básica de la Edificación NBE-CA-82 sobre Condiciones Acústicas en los Edificios.

NORMAS TÉCNICAS

- UNE-EN 458:2005. Protectores auditivos. Recomendaciones relativas a la selección, uso, precauciones de empleo y mantenimiento. Documento guía. AENOR, Madrid, España, 2005.
- UNE-EN ISO 7731:2006. Ergonomía. Señales de peligro para lugares públicos y lugares de trabajo. Señales acústicas de peligro (ISO 7731:2003).
- ISO 1999:1990. Acoustics. Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment.
- ISO 9612:2009 Acoustics. Determination of occupational noise exposure. Engineering method.

Referencias bibliográficas

- BARRON, R. F. Industrial noise control and acoustics. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- BERGER, E. H. ET AL. The noise manual. 5th ed. rev. Fairfax, VA: AIHA, 2003.
- FRANKS, JOHN R. Alternative Field Methods for Measuring Hearing Protector Performance AIHA Journal 64:501–509 (2003)
- GOELZER, B., HANSEN, C., COLIN H., SEHRNDT G., GUSTAV A. Occupational exposure to noise: evaluation, prevention and control. Dortmund: Federal Institute for occupational Safety and Health, 2001.
- ROYSTER, L. H., ROYSTER, J.D. The noise-vibration problem-solution workbook. Fairfax, VA: AIHA, 2002.
- SCHNEIDER, E., PAOLI, P., BRUN, E. Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo. Noise in Figures. Luxembourg: European Agency for Safety and Health at Work, 2005.
- SMEATHAM, D. Noise levels and noise exposure of workers in pubs and clubs: a review of the literature. Sudbury, Suffolk: HSE, 2002.

Notas Técnicas de Prevención

- HERNÁNDEZ, A. Confort acústico: el ruido en oficinas. INSHT. Notas Técnicas de Prevención. NTP-503.
- LUNA, P., GUASCH, J. Estimación de la atenuación efectiva de los protectores auditivos. INSHT. Notas Técnicas de Prevención. NTP-638.
- GONZÁLEZ, C. y GÓMEZ-CANO, M. Evaluación de la comunicación verbal: método SIL. INSHT. Notas Técnicas de Prevención. NTP-794.
- GONZÁLEZ, C. Evaluación del ruido en ergonomía: criterio RC MARK II. INSHT. Notas Técnicas de Prevención. NTP-795.

APÉNDICE I

FORMULARIO

PARÁMETROS BÁSICOS DE LAS ONDAS SONORAS

$$T = \frac{1}{f}$$

donde:
T: periodo
f: frecuencia

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

donde:
l= longitud de onda
c= velocidad del sonido
f= frecuencia

BANDA DE OCTAVA

$$f_c = \sqrt{f_i \cdot f_s}$$

donde:
 f_c : frecuencia central
 f_i : límite inferior de una banda de octava
 f_s : límite superior de una banda de octava

Banda de tercio de octava

$$f_s = \sqrt[3]{2} \cdot f_i$$

NIVEL DE PRESIÓN ACÚSTICA

$$L_p = L = 10 \cdot \lg \left(\frac{P}{P_0} \right)^2$$

donde:
 P_0 : presión de referencia ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa)
P: valor eficaz de la presión acústica (Pa)

NIVEL DE EXPOSICIÓN SEMANAL EQUIVALENTE LAeq,s

$$L_{Aeq,s} = 10 \cdot \lg \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{i=m} 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,di}}$$

donde:
m: número de días a la semana de exposición
 $L_{Aeq,di}$: nivel de exposición diario equivalente correspondiente al día «i»

NIVEL DE PICO

$$L_{\text{pico}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{\text{pico}}}{P_0} \right)^2$$

donde:

P_{pico} : valor máximo de la presión acústica instantánea (Pa)

P_0 : presión de referencia ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa)

NIVEL DE POTENCIA SONORA O ACÚSTICA

$$L_w = 10 \cdot \lg \frac{W}{W_0}$$

donde:

L_w : es el Nivel de Potencia Sonora (dB)

W : es la potencia sonora de la fuente (W)

W_0 : es un valor constante de referencia igual a 1 pW
 $= 10^{-12}$ W)

PRESIÓN SONORA RESULTANTE DE 2 PRESIONES SONORAS

$$P_{A+B} = \sqrt{P_A^2 + P_B^2}$$

ADICIÓN DE NIVELES SONOROS

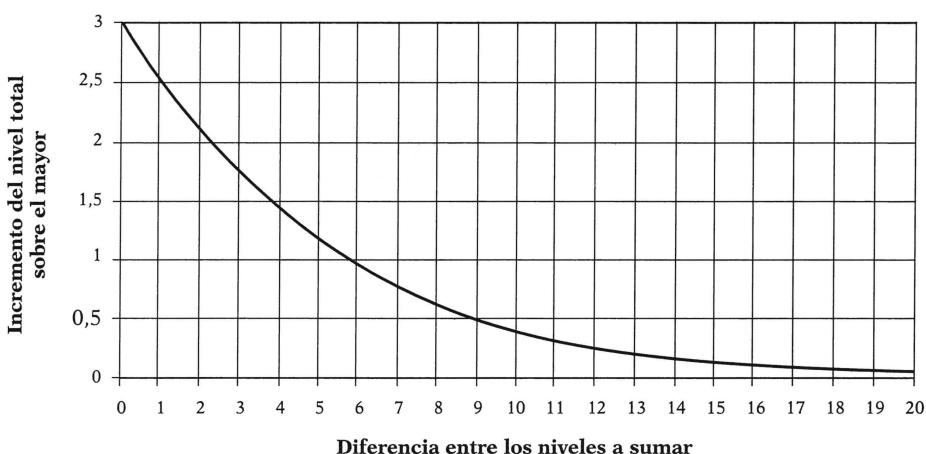
$$L_T = 10 \cdot \lg \sum 10^{\frac{L_i}{10}}$$

donde:

L_i : niveles sonoros (dB o dB(A))

L_T : nivel global (dB o dB(A))

Adición de niveles sonoros



SUSTRACCIÓN DE NIVELES DE RUIDO

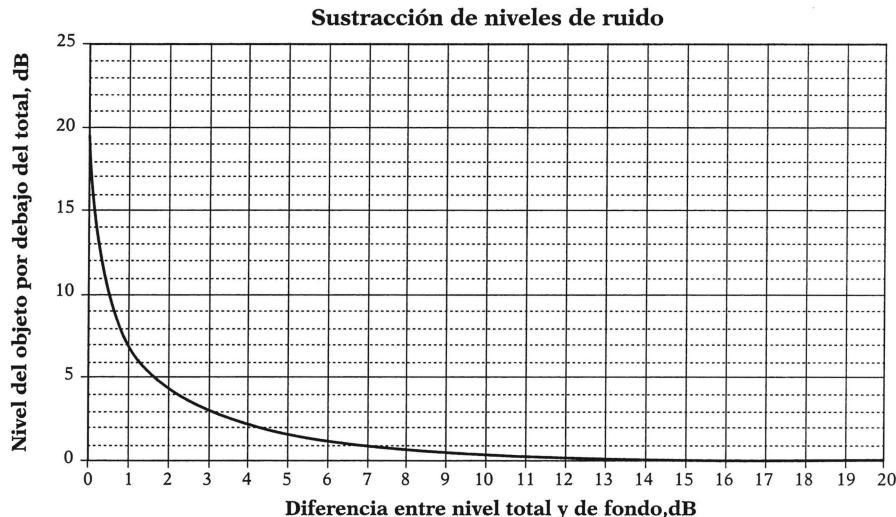
$$L_m = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{L_T}{10}} - 10^{\frac{L_F}{10}} \right)$$

donde:

L_m : nivel de la máquina (dB o dB(A))

L_T : nivel global (dB o dB(A))

L_F : nivel con máquina parada (dB o dB(A))



NIVEL EQUIVALENTE A PARTIR DE LOS NIVELES INDIVIDUALES (RUIDO DISCONTINUO)

$$L_{eq,T} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{T} \sum T_i \cdot 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad \text{donde:}$$

$$T = \sum T_i$$

L_i : nivel sonoro (dB o dB(A)) en el periodo «i»

T_i : duración del periodo «i»

$L_{eq,T}$: nivel equivalente (dB o dB(A)) en el tiempo «T»

T y T_i en las mismas unidades

CÁLCULO DEL NIVEL DIARIO EQUIVALENTE

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \cdot \lg \frac{T}{8}$$

donde:

T : duración de la exposición (h)

$L_{Aeq,T}$: nivel equivalente en el periodo T (dB(A))

$L_{Aeq,d}$: nivel diario equivalente (dB(A))

CÁLCULO DE LA DOSIS PARCIAL DE RUIDO

$$\% \text{EMP}_x = 100 \frac{T_x}{8} 10^{\frac{L_x-85}{10}}$$

donde:

T_x : duración de la exposición (h)

L_x : nivel sonoro en el periodo, debe ser constante (dB(A))

$\% \text{EMP}_x$: dosis parcial de ruido (%)

CÁLCULO DE LA DOSIS DIARIA DE RUIDO

$$\% \text{EMP} = \sum \% \text{EMP}_x$$

donde:

$\% \text{EMP}_x$: dosis en cada periodo de exposición (%)

$\% \text{EMP}$: dosis diaria (%)

CÁLCULO DEL NIVEL DIARIO EQUIVALENTE

$$L_{\text{Aeq,d}} = 85 + 10 \cdot \lg \frac{\% \text{EMP}}{100}$$

donde:

$\% \text{EMP}$: dosis diaria (%)

CÁLCULO DEL NIVEL DIARIO EQUIVALENTE A PARTIR DE LOS NIVELES (RUIDO DISCONTINUO)

$$L_{\text{Aeq,d}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{8} \sum T_i \cdot 10^{L_i/10} \right)$$

donde:

L_i : nivel sonoro (dB(A)) en el periodo «i»

T_i : duración del periodo «i» (h)

$L_{\text{Aeq,d}}$: nivel diario equivalente (dB(A))

CÁLCULO DEL NIVEL DIARIO EQUIVALENTE A PARTIR DE LECTURAS DOSÍMETRICAS

$$L_{\text{Aeq,d}} = L_{\text{ref}} + 10 \cdot \lg \left(\frac{\% \text{Dosis}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ref}}}{T_{\text{med}}} \cdot \frac{T}{8} \right)$$

donde:

L_{ref} : nivel de ajuste del dosímetro (normalmente el valor límite)¹

T_{ref} : tiempo de ajuste del dosímetro (normalmente 8 horas)

$\% \text{Dosis}$: lectura del dosímetro (%)

T_{med} : duración de la medición (mismas unidades que T_{ref})

¹ Se ha tomado como valor de referencia 85 dB(A), de acuerdo con el Real Decreto 286/2006

T: duración diaria de la exposición (mismas unidades)

$L_{Aeq,d}$: nivel diario equivalente (dB(A))

T_{ref} y L_{ref} : los ajustes del dosímetro para los que la dosis indicada es el 100%

CÁLCULO DEL TIEMPO MÁXIMO DE EXPOSICIÓN

$$T_{EMP} = 8 \cdot 10^{\frac{85 - L_{Aeq,T}}{10}}$$

donde:

T_{EMP} : tiempo máximo de exposición permitido (h)

$L_{Aeq,T}$: nivel equivalente durante un tiempo «T» (dB(A))

CÁLCULO DE LA EXPOSICIÓN MÁXIMA PERMITIDA O DOSIS DIARIA (TANTO POR 1)

$$EMP(0/1) = 10^{\frac{L_{Aeq,d} - 85}{10}}$$

donde:

$EMP(0/1)$: dosis diaria en tanto por 1

$L_{Aeq,d}$: nivel diario equivalente (dB(A))

T_{exp} : tiempo de exposición a un nivel de ruido

T_{EMP} : tiempo máximo de exposición permitido al mismo nivel de ruido. (T_{exp} y T_{EMP} en las mismas unidades)

ESCALAS NORMALIZADAS DE PONDERACIÓN A y C

Frec. (Hz)	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1.000
Ponderación A (dB)	-26,2	-22,5	-19,1	-16,1	-13,4	-10,9	-8,6	-6,6	-4,8	-3,3	-1,9	-0,8	0,0
Ponderación C (dB)	-0,8	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Frec. (Hz)	1.250	1.600	2.000	2.500	3.150	4.000	5.000	6.300	8.000	10.000	12.500
Ponderación A (dB)	0,6	1,0	1,2	1,3	1,2	1,0	0,5	-0,1	-1,1	-2,5	-4,3
Ponderación C (dB)	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,5	-0,8	-1,3	-2,0	-3,0	-4,4	-6,2

MÉTODO DE H, M y L

$$L'_A = L_A - PNR \quad \text{Si } L_C - L_A \leq 2 \text{ dB} \quad PNR = M - \frac{(H - M) \cdot (L_C - L_A - 2)}{4}$$

$$\text{Si } L_C - L_A \geq 2 \text{ dB} \quad PNR = M - \frac{(M - L) \cdot (L_C - L_A - 2)}{8}$$

donde:

L'_A : nivel de ruido resultante tras la atenuación (dB(A))

L_A : nivel de ruido (dB(A))

L_C : nivel de ruido (dB(C))

PNR: Reducción prevista de ruido

M: parámetro de atenuación para frecuencias altas (facilitado por el fabricante)

H: parámetro de atenuación para frecuencias medias (facilitado por el fabricante)

L: parámetro de atenuación para frecuencias bajas (facilitado por el fabricante)

MÉTODO DE H, M y L DE CONTROL

Ruido de baja frecuencia $L'_A = L_A - L$

Ruido de media-alta frecuencia $L'_A = L_A - M$

donde:

L'_A : nivel de ruido resultante tras la atenuación (dB(A))

L_A : nivel de ruido (dB(A))

L: parámetro de atenuación (facilitado por el fabricante)

M: parámetro de atenuación (facilitado por el fabricante)

ATENUACIÓN DEL RUIDO DE IMPACTO

Bajas frecuencias $L'_{\text{pico}} = L - 5$

Frecuencias medias y altas $L'_{\text{pico}} = M - 5$

Altas frecuencias $L'_{\text{pico}} = H$

L'_{pico} : nivel de ruido resultante tras la atenuación (dB)

MÉTODO SNR

$$L'_A = L_C - \text{SNR}$$

donde:

L'_A : nivel de ruido resultante tras la atenuación (dB(A))

L_C : nivel de ruido (dB(C))

SNR: parámetro de atenuación (facilitado por el fabricante)

TIEMPO TOTAL DE MUESTREO A PARTIR DEL NÚMERO DE TRABAJADORES

Tabla 1. Tiempo total de muestreo a partir del nº de trabajadores (N)

Número de trabajadores (N) del Grupo homogéneo	Duración mínima acumulada de las mediciones (horas)
$N \leq 5$	5
$5 < N \leq 15$	$5 + \left(\frac{N-5}{2} \right)$
$15 < N \leq 40$	$10 + \left(\frac{N-15}{4} \right)$
$N > 40$	17 o subdividir el grupo

INCERTIDUMBRE DEL MUESTREO

Tabla 2. Contribución $c_1 u_1$ a la incertidumbre del muestreo (Estrategia basada en el trabajo)

N	Incertidumbre estándar de los valores medidos de $L_{Aeq,T,n}$ ($u_1 = \sigma n^{-1}$)											
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
5	0,3	0,7	1,2	1,7	2,4	3,3	4,4	5,6	6,9	8,5	10,2	12,1
6	0,3	0,6	0,9	1,4	1,9	2,6	3,3	4,2	5,2	6,3	7,6	8,9
7	0,2	0,5	0,8	1,2	1,6	2,2	2,8	3,5	4,3	5,1	6,1	7,2
8	0,2	0,5	0,7	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,6	4,4	5,2	6,1
9	0,2	0,4	0,7	1,0	1,3	1,7	2,1	2,6	3,2	3,9	4,6	5,4
10	0,2	0,4	0,6	0,9	1,2	1,5	1,9	2,4	2,9	3,5	4,1	4,8
12	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0	1,3	1,7	2,0	2,5	2,9	3,5	4,0
14	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	1,8	2,2	2,6	3,0	3,5
16	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8	1,1	1,3	1,6	2,0	2,3	2,7	3,2
18	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,1	2,5	2,9
20	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,7	2,0	2,3	2,6
25	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3
30	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0

INCERTIDUMBRE DEL INSTRUMENTO DE MEDIDA

Tabla 3. Incertidumbre estándar de los instrumentos de medida ISO 9612:2009

Tipo de instrumento	Incertidumbre estándar (u_2) en dB
Sonómetro de clase 1 (según IEC 61672-1)	0,7
Dosímetro personal (según IEC 61252)	1,5
Sonómetro de clase 2 (según IEC 61672-1)	1,5

INCERTIDUMBRE POR LA POSICIÓN DEL MICRÓFONO

Tabla 4. Incertidumbre estándar u_3 debida a la posición del micrófono (*)

Características de la medición	Incertidumbre estándar (u_3) en dB	
	El trabajador se halla en campo reverberante	El trabajador recibe mayoritariamente sonido directamente de la fuente
Medición con el trabajador ausente	0,3	0,5
Medición con dosímetro personal o el trabajador presente	0,9	1,5

(*) Aunque en la Guía técnica del Real Decreto 286/2006 figura esta tabla, la versión definitiva de la ISO 9612:2009, en cuyos borradores se basaba, acepta que en cualquier caso se tome $u_3=1,0$ dB.

NIVEL DE INTERFERENCIA CONVERSACIONAL

Tabla 5. Distancia máxima a la que se considera que la comunicación es satisfactoriamente inteligible

L_{SIL}^*	DISTANCIA MÁXIMA (m)	
	Comunicación crítica	Comunicación normal prolongada
30	39,8	5,62
35	22,3	3,16
40	12,5	1,77
45	7,07	1
50	3,98	0,56
55	2,23	0,31
60	1,25	0,17
65	0,70	0,10
70	0,39	0,05
75	0,22	0,03

* Las distancias para valores L_{SIL} intermedios se calculan por interpolación lineal.

Tabla 6. Distancia máxima a la que se considera que la comunicación es satisfactoriamente inteligible en el caso de hablantes u oyentes no nativos

L_{SIL}	DISTANCIA MÁXIMA (m)	
	Comunicación crítica	Comunicación normal prolongada
30	25,1	3,54
35	14,1	1,99
40	7,94	1,12
45	4,46	0,63
50	2,50	0,35
55	1,41	0,19
60	0,79	0,11
65	0,44	0,06
70	0,25	0,03
75	0,14	0,01

* Las distancias para valores L_{SIL} intermedios se calculan por interpolación lineal.

Tabla 7. Distancia máxima a la que se considera que la comunicación es satisfactoriamente inteligible en el caso de personas con trastornos leves de la audición (en general, mayores de 60 años)

L_{SIL}	DISTANCIA MÁXIMA (m)	
	Comunicación crítica	Comunicación normal prolongada
30	28,1	3,98
35	15,8	2,23
40	8,91	1,25
45	5,01	0,70
50	2,81	0,39
55	1,58	0,22
60	0,89	0,12
65	0,50	0,07
70	0,28	0,03
75	0,15	0,02

* Las distancias para valores L_{SIL} intermedios se calculan por interpolación lineal.

Tabla 8. Límites del Nivel de presión sonora del ruido de fondo que interfiere en la comunicación verbal cara a cara*

Esfuerzo vocal	K, dB(A)		Comentario
	Mujeres	Hombres	
Voz normal	50	54	La comunicación es satisfactoria para el esfuerzo vocal considerado
Voz elevada	56	60	
Voz fuerte	62	66	
Voz muy fuerte	67	71	
Gritando	72	76	La comunicación es difícil
Gritando al máximo	75	79	Por encima de este nivel es imposible la comunicación si no hay amplificación
Límite para habla amplificada	110	114	Por encima de este nivel es imposible la comunicación

* La información comunicada no es familiar para el oyente

Si la comunicación se da entre mujeres y hombres, se deben usar los datos de la columna "mujeres"

MÉTODO RC MARK II

Tabla 9. Criterios para la interpretación de la valoración RC Mark II

Descriptor de Calidad Sonora	Descripción de la percepción subjetiva	Magnitud del QAI	Resultado de la evaluación.*
(N) Neutro	Espectro sonoro equilibrado, no existe un único rango de frecuencias dominantes.	QAI ≤ 5 dB, $L_{16}, L_{31,5} \leq 65$	ACEPTABLE
		QAI ≤ 5 dB, $L_{16}, L_{31,5} > 65$	MODERADO
(LF) Baja Frecuencia (Estruendo)	Rango de bajas frecuencias dominante (16 – 63 Hz)	5 dB < QAI ≤ 10 dB	MODERADO
		QAI > 10 dB	INACEPTABLE
(LFV _B) Estruendo, con vibración superficial moderadamente perceptible en el local	Rango de bajas frecuencias dominante (16 – 63 Hz)	QAI ≤ 5 dB, $65 < L_{16}, L_{31,5} < 75$	MODERADO
		5 dB < QAI ≤ 10 dB	MODERADO
		QAI > 10 dB	INACEPTABLE
(LFV _A) Estruendo, con vibración superficial moderadamente perceptible en el local	Rango de bajas frecuencias dominante (16 – 63 Hz)	QAI ≤ 5 dB, $L_{16}, L_{31,5} > 75$	MODERADO
		5 dB < QAI ≤ 10 dB	MODERADO
		QAI > 10 dB	INACEPTABLE
(MF) Media Frecuencia	Rango de medias frecuencias dominante (125 – 500 Hz)	5 dB < QAI ≤ 10 dB	MODERADO
		QAI > 10 dB	INACEPTABLE
(HF) Alta Frecuencia	Rango de altas frecuencias dominante (1.000 – 4.000 Hz)	5 dB < QAI ≤ 10 dB	MODERADO
		QAI > 10 dB	INACEPTABLE

* Asumiendo que no se supera el Nivel de criterio recomendado

MEDIDA DE LA ABSORCIÓN ACÚSTICA DE UN LOCAL

$$A = \sum \alpha_i \cdot S_i$$

donde:

A: absorción acústica del local (m²) α_i : coeficiente de absorción de cada material S_i : superficie de cada material (m²)**COEFICIENTE MEDIO DE ABSORCIÓN**

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{\sum S_i} = \frac{A}{\sum S_i}$$

donde:

 $\bar{\alpha}$: coeficiente medio de absorción α_i : coeficiente de absorción de cada material S_i : superficie de cada material (m²)A: absorción acústica del local (m²)**TIEMPO DE REVERBERACIÓN DE UN LOCAL (ECUACIÓN DE NORRIS-EYRING)**

$$T_R = \frac{0,161 \cdot V}{S \left[-\ln(1 - \bar{\alpha}) \right]}$$

donde:

 T_R : tiempo de reverberación (s)V: volumen del local (m³) $\bar{\alpha}$: coeficiente medio de absorción**CONSTANTE DEL LOCAL (R)**

$$R = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{1 - \bar{\alpha}}$$

R: constante del local (m²)**NIVEL SONORO EN UN LOCAL (CAMPO DIRECTO + CAMPO DIFUSO)**

$$L = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

donde:

L: nivel de presión sonora en un punto del local (dB)

 L_w : nivel de potencia sonora de la fuente (dB)

Q: factor de directividad de la fuente (adimensional)

r: distancia a la fuente de ruido (m)

R: constante del local (m²)

DISTANCIA CRÍTICA

$$\frac{Q}{4\pi r_c^2} = \frac{4}{R} \Rightarrow r_c = 0,14\sqrt{QR}$$

$$\text{Para } Q = 2 \Rightarrow r_c = 0,2\sqrt{R}$$

Si consideramos sólo el campo difuso y la absorción del local es baja ($R \rightarrow A$)

$$L = L_w - 10 \cdot \lg \frac{A}{4}$$

donde:

L : nivel de presión sonora (dB)

A : absorción acústica del local (m^2)

L_w : nivel de potencia sonora de la fuente (dB)

TRANSMISIÓN DESDE LOCAL ADYACENTE

$$\left(\frac{S_w}{2\pi}\right)^{1/2} > r_2 \rightarrow L_2 = L_w - IA + 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{4 \cdot S_w}{R_2}\right) - 10 \cdot \lg R_1$$

$$\left(\frac{S_w}{2\pi}\right)^{1/2} < r_2 \rightarrow L_2 = L_w - IA + 10 \cdot \lg \left(\frac{4 \cdot S_w}{R_2} + \frac{S_w}{2\pi \cdot r_2^2}\right) - 10 \cdot \lg R_1$$

donde:

S_w : superficie de la pared de separación

r_2 : distancia del punto del local 2 a la pared de separación

L_2 : nivel de presión sonora en el local 2 en un punto a distancia r_2 de la pared de separación

L_w : nivel de potencia de la máquina situada en el local 1

IA : índice de aislamiento de la pared separadora

R_1 : constante del local 1 (emisor)

R_2 : constante del local 2 (receptor)

REDUCCIÓN DEL NIVEL SONORO MEDIANTE ABSORCIÓN

$$L_2 = L_1 - 10 \cdot \lg \left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

donde:

L_1 : nivel sonoro en el local antes del tratamiento acústico

L_2 : nivel sonoro en el local después del tratamiento acústico

A_1 : superficie de absorción del local antes del tratamiento acústico

A_2 : superficie de absorción del local después del tratamiento acústico

AISLAMIENTO ACÚSTICO BRUTO DE UN LOCAL RESPECTO A OTRO

$$D = L_e - L_r$$

donde:

L_e : nivel sonoro en el local emisor (dB)

L_r : nivel sonoro en el local receptor (dB)

AISLAMIENTO ACÚSTICO NORMALIZADO

$$IA = D + 10 \cdot \lg \left(\frac{S}{R} \right)$$

donde:

D: aislamiento bruto entre locales (dB)

S: superficie del elemento separador (m^2)

R: constante del local receptor (m^2)

LEY DE LA MASA

$$f < f_c \rightarrow IA = 20 \cdot \lg (m_s \cdot f) - 47,3$$

$$f \geq f_c \rightarrow IA = 20 \cdot \lg (m_s \cdot f_c) - 48 + 10 \cdot \lg \eta + 33,22 \cdot \lg \left(\frac{f}{f_c} \right)$$

donde:

IA: aislamiento específico (dB)

m_s : masa superficial del panel (kg/m^2)

f: frecuencia del sonido (Hz) (usar valor central de la banda)

f_c : frecuencia de coincidencia (Hz) (usar valor central de la banda)

η : factor de pérdidas del panel

PÉRDIDA POR INSERCIÓN DE UN CERRAMIENTO

$$IL = IA + 10 \cdot \lg \frac{A}{S}$$

donde:

IA: aislamiento específico (dB)

IL: pérdida por inserción (dB)

S: superficie del cerramiento (m^2)

A: absorción acústica del interior del cerramiento (m^2)

AISLAMIENTO DE PAREDES COMPUESTAS

$$IA_g = 10 \cdot \lg \frac{\sum S_i}{\sum 10^{IA_i/10}}$$

donde:

IA_g : aislamiento acústico global

S_i : área de cada elemento que forma la separación

IA_i : aislamiento específico de cada elemento

Para una partición formada por dos materiales, en los que uno es un orificio ($a=0$) y el otro tiene un alto índice de aislamiento, la ecuación anterior puede simplificarse como:

$$IA_g = -10 \cdot \lg (S_{\text{orif}} / S_{\text{pared}})$$

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN ACÚSTICA (α) PARA DISTINTOS MATERIALES

	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Ladrillo visto	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Hormigón, terrazo	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Mármol	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Bloques de hormigón pintados	0,01	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Bloques de hormigón sin pintar	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25
Enlucido de yeso	0,12	0,09	0,07	0,05	0,05	0,04
Vidrio en ventana	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Parqué de madera sobre hormigón	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Cortinas 340 g/m ²	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortinas 475 g/m ²	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Fibra de vidrio 50 kg/m ³						
Espesor 25 mm	0,08	0,25	0,65	0,85	0,80	0,75
Espesor 50 mm	0,17	0,50	0,75	0,90	0,85	0,80
Moqueta de 4 mm	0,02	0,03	0,06	0,15	0,23	0,47
Moqueta de 10 mm	0,03	0,08	0,20	0,28	0,37	0,45
Agua en piscina	0,008	0,008	0,013	0,015	0,02	0,025
Ventana abierta	1	1	1	1	1	1
Persona sentada (m ²)	0,21	0,35	0,46	0,45	0,50	0,35
Sillas de madera (m ²)	0,01		0,02		0,02	
Sillón acolchado (m ²)	0,19		0,28		0,28	

PESOS ESPECÍFICOS, FRECUENCIA DE COINCIDENCIA Y FACTOR DE PÉRDIDAS DE DISTINTOS MATERIALES

Material	Peso específico (kg/m ³)	e-fc (mm Hz)	Factor de pérdidas
Aluminio	2.700	13.000	0,001
Ladrillo macizo	2.200	16.000 – 26.000	0,01
Hormigón macizo	2.300	18.500	0,01
Cemento (5 cm) a ambos lados de una tabla	1.500	32.500	0,01
Ladrillo hueco (15 cm)	750	31.000	0,01
Bloque hueco de hormigón	1.100	21.000	0,015
Bloque de hormigón relleno de arena	1.700	25.000	
Madera de abeto	550	9.000	0,04
Madera contrachapada	600	21.000	0,03
Madera aglomerada	750	97.500	0,02
Vidrio	2.500	15.200	0,01
Acero	7.700	12.500	0,001
Plomo	11.000	55.000	0,015

APÉNDICE II

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Absorción acústica: proceso por el cual se transforma la energía acústica en energía térmica.

Acústica: ciencia que estudia la propagación, transmisión y efectos del ruido.

Aislamiento acústico: conjunto de técnicas utilizadas para la reducción de la transmisión del ruido.

Amplitud: magnitud instantánea que indica el valor de presión acústica de una onda sonora.

Ánálisis de banda de octava: un análisis de los niveles sonoros y atenuación en bandas separadas por una octava. El mínimo requerido en Europa son las cifras para 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 y 8.000 hertz.

Atenuación: reducción del nivel de presión acústica como en “atenuación con protector auricular”.

Banda: segmento del espectro de frecuencias.

Banda de octava: segmento del espectro de frecuencias cuyo ancho es de una octava.

Banda de tercio de octava: segmento del espectro de frecuencias cuyo ancho es de un tercio de octava.

Campo lejano: región del campo sonoro en la que el nivel de presión acústica decrece 6 dB al doblar la distancia de la fuente de sonido.

Campo libre: región en la que el sonido se propaga en todas las direcciones sin que esté afectado por las reflexiones en objetos.

Campo reverberante: región en un recinto donde predomina el sonido reflejado respecto al sonido directo, resultado de la superposición de las reflexiones en los cerramientos.

Coeficiente de absorción (α): valoración de la capacidad de un material para absorber sonido. Se define como la relación entre la cantidad de energía incidente y la energía reflejada. Los valores de esta magnitud oscilan entre 0 y 1. Esta magnitud varía con la frecuencia y con el ángulo de incidencia.

Decibelio (dB): unidad de medida del nivel de presión acústica. Término que representa la relación de dos cantidades: el nivel sonoro que se mide y un nivel sonoro de referencia correspondiente aproximadamente a los sonidos más débiles perceptibles por el oído humano. Cuanto mayor es el nivel sonoro medido en dB, más alto es el sonido.

Desviación normal o estándar: una medida de la variabilidad de un conjunto de puntos de datos alrededor de su media (nivel medio).

Escala de ponderación: filtro electrónico incorporado a los instrumentos de medida que modifica la señal captada por el micrófono de forma similar a como lo hace el oído humano. Se suele utilizar la escala de ponderación "A", ya que se ha comprobado que los niveles sonoros medidos utilizando esta escala se correlacionan bastante bien con las pérdidas auditivas inducidas por ruido. La escala "C" equivale prácticamente a la medida sin ponderación (lineal).

Esfuerzo vocal: esfuerzo del hablante, cuantificado objetivamente mediante el nivel sonoro verbal, ponderado A, medido a 1 m de distancia frente a la boca y calificado subjetivamente mediante una descripción.

Espectro de frecuencia: gráfico de los niveles de presión sonora en cada banda de octava o de tercio de octava.

Foso de orquesta: en los teatros, es la zona en la que actúa la orquesta, situada a un nivel inferior respecto al escenario, normalmente situada frente a éste y parcialmente cubierta por el mismo.

Frecuencia: se refiere a un fenómeno periódico de ocurrencia cíclica como una onda sonora. La frecuencia es el número de veces que se repite la onda en un segundo; es decir, ciclos por segundo. La unidad de frecuencia es el Hertz (Hz) que corresponde a 1 ciclo por segundo.

Frecuencias audibles: cualquier frecuencia entre 20 y 20.000 Hz.

Fuente sonora: elemento que genera sonido.

H, M y L: parámetros de atenuación de un protector auditivo a altas (H), medias (M) y bajas (L) frecuencias.

Hertz: Vver frecuencia.

Intensidad acústica: cantidad de potencia acústica radiada por unidad de superficie. Su unidad es el vatio por metro cuadrado (W/m^2).

Inteligibilidad verbal: proporción del diálogo que es comprendida.

k: prefijo que indica multiplicación por 1.000; por ejemplo, 1 kHz equivale a 1.000 Hz.

L_{eq} : nivel de presión acústica continua equivalente. Una medida del nivel de presión acústica media durante un periodo de tiempo.

Ley de la masa: expresión matemática que describe de forma aproximada las pérdidas de transmisión de una pared homogénea. Según esta expresión, al doblar el valor de masa por unidad de superficie se consigue un incremento en el aislamiento de 6 dB por octava.

L_{N} : nivel de presión sonora equivalente medido en la posición del oído del oyente, en la banda de octava "I".

L_{SIL} : Nivel de presión sonora que interfiere en la comunicación verbal.

Logaritmo: el logaritmo de un número, en una base dada, es el exponente al cual se debe elevar la base para obtener dicho número.

Longitud de onda: distancia entre dos puntos de una onda sonora con el mismo valor de amplitud. Esta magnitud es inversamente proporcional a la frecuencia.

Monitores intra-auditivos: los IEM (“In-ear monitors”) son auriculares similares a los tapones con altavoces en miniatura integrados. Deberían llevar integrados limitadores acústicos.

Nivel de Interferencia Verbal o Speech Interference Level (SIL): diferencia entre el nivel sonoro verbal, ponderado A, y la media aritmética de los niveles de presión sonora del ruido ambiental, en cuanto a bandas de octava, con frecuencias centrales de 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz y 4000 Hz.

Octava: intervalo de frecuencias, desde f_1 a f_2 , en el que se cumple la siguiente relación: $f_2 = 2 \cdot f_1$.

Pascal: unidad de medida de la presión acústica.

Ponderación A: corrección que se efectúa a un espectro de ruido en cada banda de octava, para reflejar la forma en que percibiría el ruido una persona y su potencial daño sobre el oído humano. Los niveles sonoros así filtrados o corregidos se expresan en dB(A).

Ponderación C: pequeña corrección del nivel de ruido sobre las frecuencias muy bajas y muy altas, por lo que el espectro resultante es muy parecido a la escala lineal. Los niveles sonoros así filtrados o corregidos se expresan en dB(C).

Potencia acústica: cantidad total de energía acústica radiada por una fuente sonora. Su unidad es el vatio (W).

Presión acústica: diferencia instantánea entre la presión producida por una onda sonora y la presión barométrica en un punto del espacio.

Reflexión: energía acústica devuelta después de incidir la onda en una superficie.

Refracción: Desviación de una onda sonora de su camino original, que se produce al atravesar medios de diferentes características.

Reverberación: persistencia de un sonido en un espacio cerrado consecuencia de múltiples reflexiones en las superficies del recinto y después de que la fuente sonora haya dejado de emitir.

Ruido: generalmente definido como sonido no deseable.

Ruido aéreo: ruido que se propaga por el aire hasta llegar a nuestro oído.

Ruido aleatorio: aquel cuya diferencia entre los valores máximo y mínimo de L_{pA} es superior o igual a 5 dB, variando L_{pA} aleatoriamente a lo largo del tiempo.

Ruido ambiental: ruido de fondo relacionado con un entorno determinado. Típicamente es una composición de sonidos de muchas fuentes situadas cerca y lejos. No predomina ningún sonido en especial.

Ruido blanco: ruido que se caracteriza por tener la misma energía sonora, el mismo nivel de presión sonora y la misma densidad de potencia espectral en cada frecuencia del espectro sonoro.

Ruido estacionario o continuo: aquel cuyo nivel de presión acústica ponderada A (L_{pA}) permanece esencialmente constante. Se considerará que se cumple tal condición cuando la diferencia entre los valores máximo y mínimo de L_{pA} sea inferior a 5 dB.

Ruido de fondo: ruido inherente a un recinto en ausencia de fuentes de ruido externas.

Ruido de impulso o impacto: se considera que un ruido es de impulso cuando el nivel de presión acústica decrece exponencialmente con el tiempo (su duración es del orden de microsegundos) y los sucesivos impactos están separados entre sí más de un segundo.

Ruido estructural: ruido que se transmite a través de la estructura del edificio. Suele ser provocado por el choque de un objeto contra el suelo o por las vibraciones excesivas de una máquina fijada directamente al suelo.

Ruido periódico: aquel cuya diferencia entre los valores máximo y mínimo de L_{PA} es superior o igual a 5 dB y cuya cadencia es cíclica.

Ruido rosa: ruido que se caracteriza por tener la misma energía sonora y el mismo nivel de presión sonora en cada banda de frecuencia (por ejemplo, de octava) del espectro sonoro. La densidad de potencia espectral decrece 3 dB en bandas de octava sucesivas. La diferencia entre el ruido blanco y el ruido rosa es que el primero considera la frecuencia en unidades y el segundo, en bandas de octava.

Sistema de PA (Public Address System): altavoz o sistema de refuerzo del sonido que emite mensajes o música dirigidos al público. Se utiliza este término para distinguir estos altavoces de los que están dirigidos hacia los intérpretes, de espaldas al público. También se puede hablar de sistema de megafonía, pero esta nomenclatura suele asociarse únicamente a los altavoces que emiten mensajes en lugar de música, cuya función consiste en amplificar la voz de un orador.

Sonido: variaciones de presión en un medio elástico, como aire, que pueden estimular la sensación auditiva.

SNR: reducción de ruido simplificada, también conocida como clasificación de un solo número. Un solo número indicando la atenuación que puede proporcionar un protector auricular.

Sonómetro: instrumento de lectura directa utilizado para medir el nivel de presión sonora expresado en decibelios. Los sonómetros pueden ser convencionales (miden niveles de sonido con ponderación temporal exponencial) o integradores-promediadores (miden niveles de sonido promediados en el tiempo).

Tercio de octava: intervalo de frecuencias, desde f_1 hasta f_2 , el cual cumple la siguiente relación: $f_2 = 1,26 \cdot f_1$.

Tiempo de reverberación: tiempo que transcurre desde que cesa la actividad de una fuente sonora, hasta que el nivel de presión acústica decrece 60 dB desde su estado estacionario. Es una medida de la persistencia de un sonido en un recinto, así como de la cantidad de absorción acústica presente en el recinto.

Tono: percepción subjetiva de la frecuencia.

Tono puro: una onda sonora consistente en energía a solamente una sola frecuencia.

Umbral de audición: el nivel más bajo de sonido que es perceptible por el oído humano (20 µPa).

UNE-EN: norma Europea adoptada como Una Norma Española.

Valores de exposición que dan lugar a una acción: niveles de exposición al ruido para los que se requiere llevar a cabo determinadas acciones establecidas en el RD 286/2006. Los valores son:

- **Valores inferiores de exposición que dan lugar a una acción:**
 - Nivel de exposición diaria o semanal de 80 dB(A).
 - Nivel de pico de 135 dB(C).
- **Valores superiores de exposición que dan lugar a una acción:**
 - Nivel de exposición diaria o semanal de 85 dB(A).
 - Nivel de pico de 137 dB(C).

Valor de inteligibilidad mínima buena: aquella que se corresponde con un valor de SIL de 15 a 21 dB(A).

Valor de inteligibilidad mínima suficiente: aquella que se corresponde con un valor de SIL de 10 a 15 dB(A).

Valores límite: niveles de exposición al ruido que no deben superarse nunca (pero tienen en cuenta la reducción de la exposición conseguida mediante el uso de protección auditiva individual). Corresponden a un nivel de exposición sonora diaria o semanal de 87 dB(A) y a un nivel de presión acústica de pico de 140 dB(C).



MINISTERIO
DE TRABAJO
E INMIGRACIÓN



INSTITUTO NACIONAL
DE SEGURIDAD E HIGIENE
EN EL TRABAJO