

12. Ruido

ASPECTOS FISICOS Y SUBJETIVOS DEL SONIDO

El agente contaminante que se presenta con mayor frecuencia en el ambiente laboral es, sin lugar a dudas, el ruido. Esta afirmación se ve corroborada por las estadísticas que sobre riesgos de trabajo elabora la Organización Internacional del Trabajo. Para dotar de tal importancia a este agente inciden, entre otros factores, el incremento energético incorporado a las instalaciones de producción, el aumento en la potencia y en la velocidad de las máquinas, los ritmos acelerados de trabajo y la adición de nuevas tecnologías.

Este panorama plantea un reto a los distintos grupos técnicos, médicos, jurídicos y demás, interesados en la prevención de riesgos de trabajo y en la sanidad industrial.

Al tratar de definir el ruido, nos encontramos ante una dualidad de enfoques; por una parte, la sensación subjetiva producida en el individuo; y, por otra, la definición objetiva que, como fenómeno físico implica.

Para el objetivo del presente trabajo, definimos al ruido de acuerdo con la Norma Mexicana NOM-C-92, que señala: "Ruido es todo sonido que cause molestias, interfiera con el sueño, trabajo o descanso o que lesione o dañe física o psicológicamente al individuo, la flora, la fauna y a los bienes de la nación o de particulares".

Ahora bien, desde el punto de vista físico, el sonido consiste en un movimiento ondulatorio que produce una serie alternada de compresiones y rarefacciones en un medio elástico y que, además, es captado por el sistema auditivo.

Para que las variaciones en la presión puedan producir una sensación auditiva, es necesario que se produzcan vibraciones del orden de 20 a 20 000 veces por segundo.

Además de la limitación que para la audibilidad presenta la frecuencia, existe otra variable importante determinada por la presión sonora ejercida. De esta manera, el umbral de percepción, para un individuo con buenas características auditivas, se produce a partir de la presión de 2×10^{-5} Nw/m² (20 μ Pa).

En términos generales, el nivel de presión sonora que el oído puede soportar sin que aparezcan efectos dolorosos (conocido como umbral del dolor), se

considera en los 20 N/m² (20 Pa). Dentro de estos límites, aceptados internacionalmente, se nos hace sentir la “fuerza” con la que escuchamos un sonido; sin embargo, si tuvieran que emplearse las unidades mencionadas, se tendría que diseñar una escala de un millón de unidades. Por tanto, con objeto de manejar una escala operativa, se ha adoptado como medida el decibel para expresar el nivel sonoro asociado con estas variaciones de presión.

Por definición, el decibel (dB) es una unidad adimensional usada para expresar diez veces el logaritmo que resulta de efectuar el cociente entre una cantidad medida y otra cantidad de referencia.

$$\text{dB} = 10 \log \left(\frac{\text{Cantidad medida}}{\text{Cantidad de referencia}} \right) \dots \text{ec. (12.1)}$$

La base de referencia, en función de la energía total debida al fenómeno vibratorio por unidad de tiempo, es el watt (W), y la potencia acústica mínima para producir la sensación de audición es 10⁻¹² (W₀). Por tanto, el nivel de potencia sonora al substituir en la ecuación 12.1, será:

$$\text{dB NWM} = 10 \log \frac{W}{W_0} \dots \text{ec (12.2)}$$

donde:

W = Potencia medida

W₀ = Potencia de referencia

También es conocido que la potencia del sonido, atraviesa perpendicularmente una superficie con respecto a la propagación de las ondas sonoras, tiene la intensidad sonora, que podemos describir como:

$$I = \frac{W}{A} \dots \text{ec (12.3)}$$

y entonces:

$$I_0 = \frac{W_0}{A} \dots \text{ec (12.4)}$$

$$\therefore W = \frac{W}{W_0} = \frac{I/A}{I_0/A} = \frac{I}{I_0} \dots \text{ec (12.5)}$$

Substituyendo (12.5) en (12.2)

$$\text{dB}_{\text{NIA}} = 10 \log \frac{I}{I_0} \dots \text{ec (12.6)}$$

I = intensidad medida (W/m^2)

I_0 = intensidad de referencia ($10^{-12} W/m^2$)

A = área (m^2)

La manifestación del sonido se mide normalmente en función de su presión, que está relacionada con la intensidad:

$$I = \frac{P^2}{\rho c} \dots \text{ec (12.7)}$$

Para el mismo medio, en condiciones similares de presión y temperatura, tendremos que:

$$I_0 = \frac{P_0^2}{\rho c} \dots \text{ec (12.8)}$$

Sustituyendo (12.7) y (12.8) en (12.6) se tiene:

$$dB_{NPA} = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)^2$$

$$dB_{NPA} = 20 \log \frac{P}{P_0} \dots \text{ec (12.9)}$$

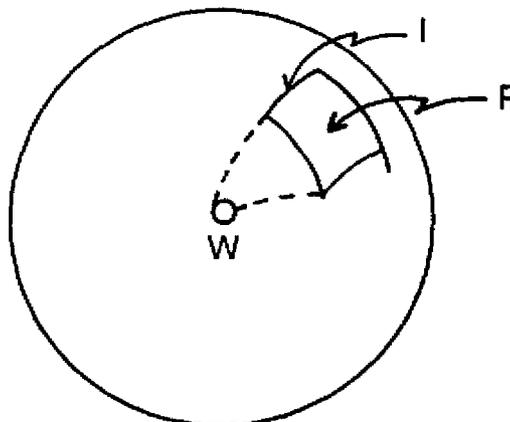
y si, como habíamos señalado, la presión mínima para estimular la audición es 20 Pa, es ésta la presión de referencia.

P = Presión medida

P_0 = Presión de referencia (20 Pa)

Figura 12.1

Descripción gráfica de la presión, intensidad y potencia



La frecuencia (f) es el número de veces que se repite el fenómeno vibratorio en un segundo, es decir, el número de veces por segundo en que un cuerpo en vibración cumple un ciclo completo.

Matemáticamente se expresa en función directa de la velocidad (c), e inversa por longitud de onda (λ).

$$f = \frac{c}{\lambda} \dots \text{ec (12.10)}$$

donde:

f = frecuencia (ciclos por segundo o Hertz)

c = velocidad (m/s)

λ = longitud de onda (m)

Como también mencionamos, el oído humano es sensible a frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y los 20 kHz, abarcando una gama de frecuencias audibles de 10 bandas denominadas bandas de octava. Una octava es el intervalo de frecuencias cuyo límite superior es el doble del límite inferior. Las denominadas "frecuencias preferidas", en el centro de las bandas de octava normalizadas (ISO-R-266-1975), están espaciadas en octavas que se encuentran desde los 16 Hz hasta los 16 kHz. En términos algebraicos se puede expresar como:

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \dots \text{ec (12.11)}$$

y como

$$f_2 = 2 f_1 \dots \text{ec (12.12)}$$

sustituyendo (12.12) en (12.11), se tiene:

$$f_m = \sqrt{2} f_1 \dots \text{ec (12.13)}$$

donde:

f_m = frecuencia central o medida (Hz)

f_1 = límite inferior de la frecuencia (Hz)

f_2 = límite superior de la frecuencia (Hz)

En el Cuadro 12.1, se presentan las frecuencias centrales, así como sus límites inferior y superior.

Cuadro No. 12.1

Frecuencias centrales noramlizadas

Inferior	Frecuencias Central	Superior
22	31.5	44
44	63	88
88	125	77
177	250	355
355	500	710
710	1 000	1 420
1 420	2 000	2 840
2 840	4 000	5 680
5 680	8 000	11 360
11 360	16 000	22 720

Hasta ahora se ha examinado al ruido en cuanto a sus propiedades físicas, pero resulta importante observarlo desde el punto de vista de la sensación subjetiva del individuo.

En realidad, la magnitud cuya medición presenta mayor importancia es la respuesta del ser humano a un sonido, lo que implica tomar en cuenta el nivel de presión sonora, la frecuencia y la singular forma de recepción y comportamiento del oído ante este fenómeno.

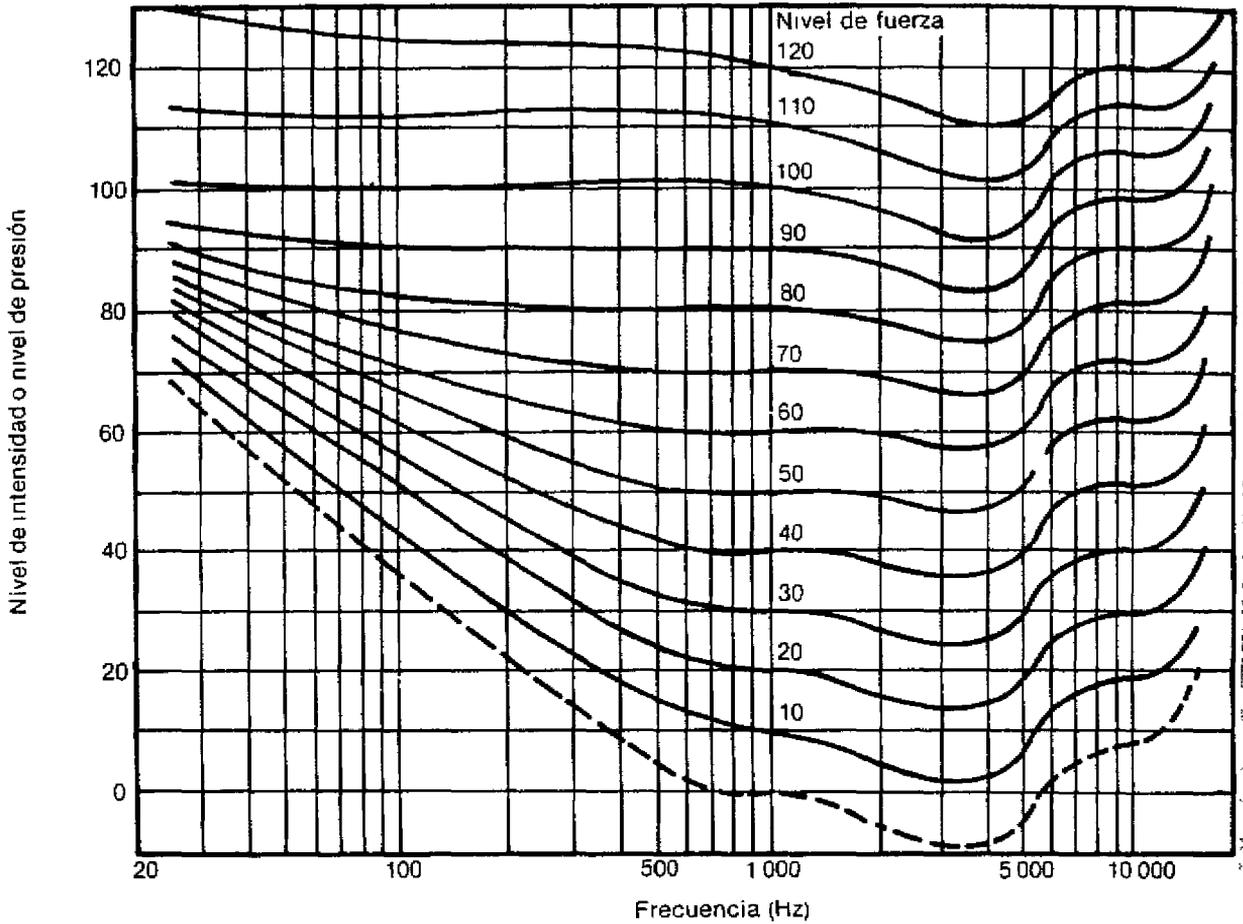
El conjunto de estos tres factores físicos y de comportamiento subjetivo no es medible por aparatos exclusivamente, y es necesario, por tanto, el estudio experimental de un grupo de individuos, quienes al reaccionar ante un número sistematizado de sonidos, configuran una explicación gráfica de la respuesta del oído humano frente a los mismos.

La magnitud física que interrelaciona a los tres factores se denomina sonio. Existen interesantes estudios al respecto, realizados desde 1933 por Fletcher y Munson, por Stevens en 1955, Robinson y Dadson en 1956 y los de Robinson y Burns en la década de los setenta.

Las figuras 12.2 y 12.3, presentan gráficamente este comportamiento.

Figura 12.2

Perfiles de insosensación sonora de Fletcher y Munson



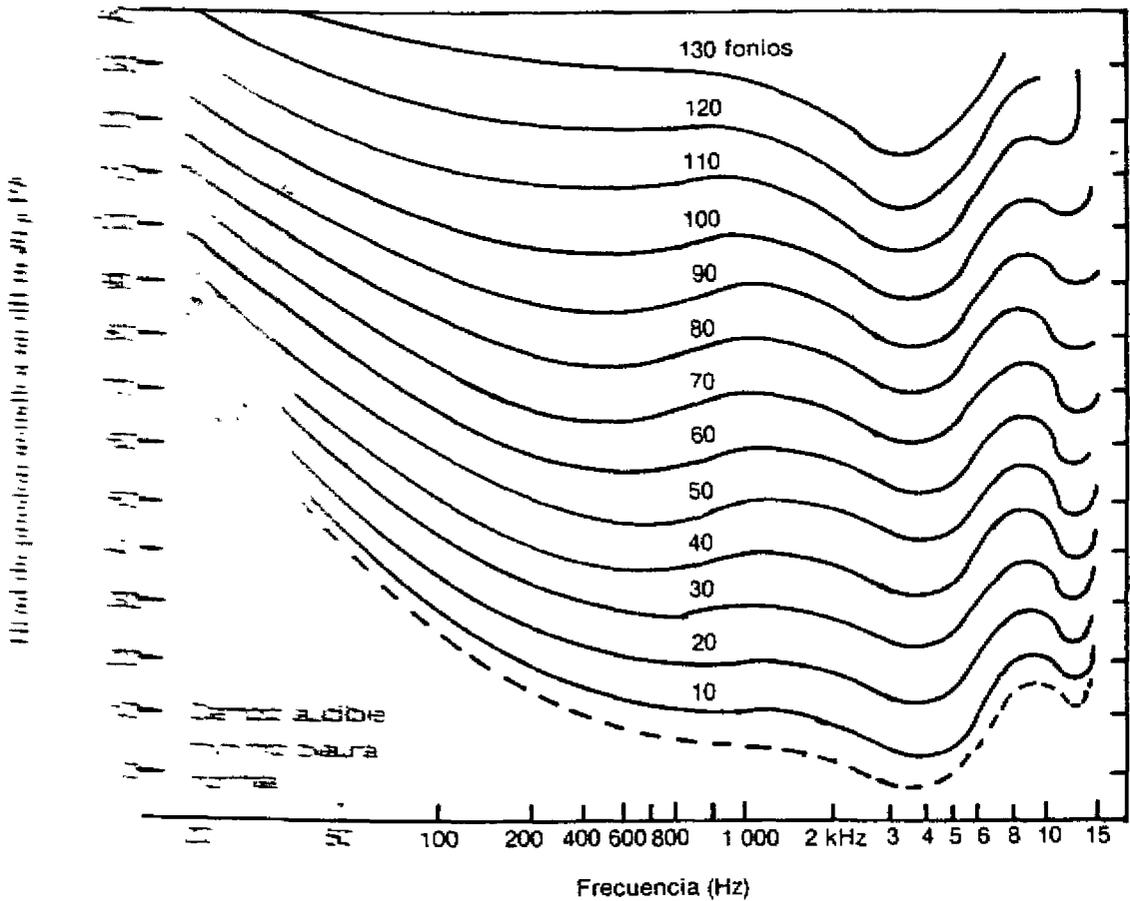
Por definición, el sonio es la sonoridad de un tono puro de 1 kHz, percibido con un nivel de presión acústica de 40 dB (re: 40 Pa), en las condiciones específicas de audición señaladas por la Organización Internacional para la Normalización en su recomendación ISO-R-131-1959.

En un sonido de una frecuencia específica, una fracción importante, por lo menos, la prioridad es proporcional a cierta potencia de la energía acústica, concordando de esta manera con la exponencial conocida como Ley de Weber y Fechner.

En la gama de frecuencias audibles intermedias, el exponente en esta Ley se comporta en forma tal que la duplicación de la sonoridad corresponde a una in-

Figura 12.3

Curvas de insosensación sonora de Robinson y Dadson



La intensidad de un tono mayor, es decir, a un cambio en diez decibeles, mientras que en las otras frecuencias la sonoridad cambia más rápidamente al modificarse la intensidad. Esto se demuestra en los experimentos realizados por Fletcher y Munson (ver figura 12.2) y por Robinson y Dadson (ver figura 12.3), de acuerdo con la recomendación R-226-1961 de la ISO. En estas figuras se muestra cómo debe variar el nivel de presión acústica del tono, a fin de mantener una sonoridad constante. De esta manera, cada curva corresponde a una sonoridad determinada en fonios.

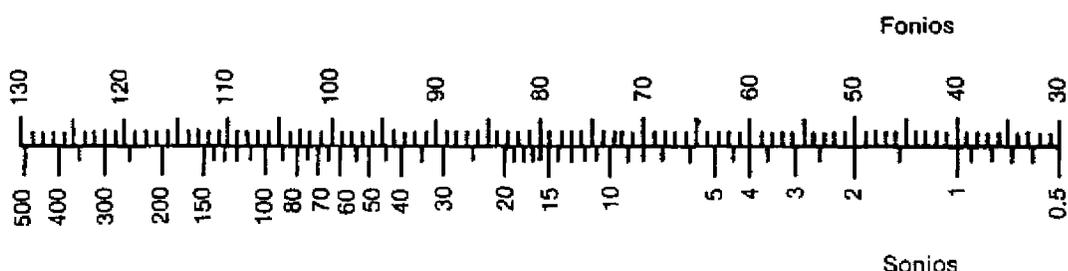
Por definición, la sonoridad medida en fonios es igual al nivel de presión acústica de 1 kHz que es igualmente sonoro en las condiciones específicas señaladas en la Recomendación R-131-1959 de la ISO. Para efectos prácticos a menudo siguiente relaciona las escalas de sonios y fonios:

$$\text{fonio} = 40 + \log_2 (\text{sonio}) \dots \text{ec (12.14)}$$

Experimentalmente se ha establecido esta ecuación (12.14), que corresponde a la figura siguiente:

Figura 12.4

Escala de relación fonios - sonios



ESCALAS DE PONDERACION

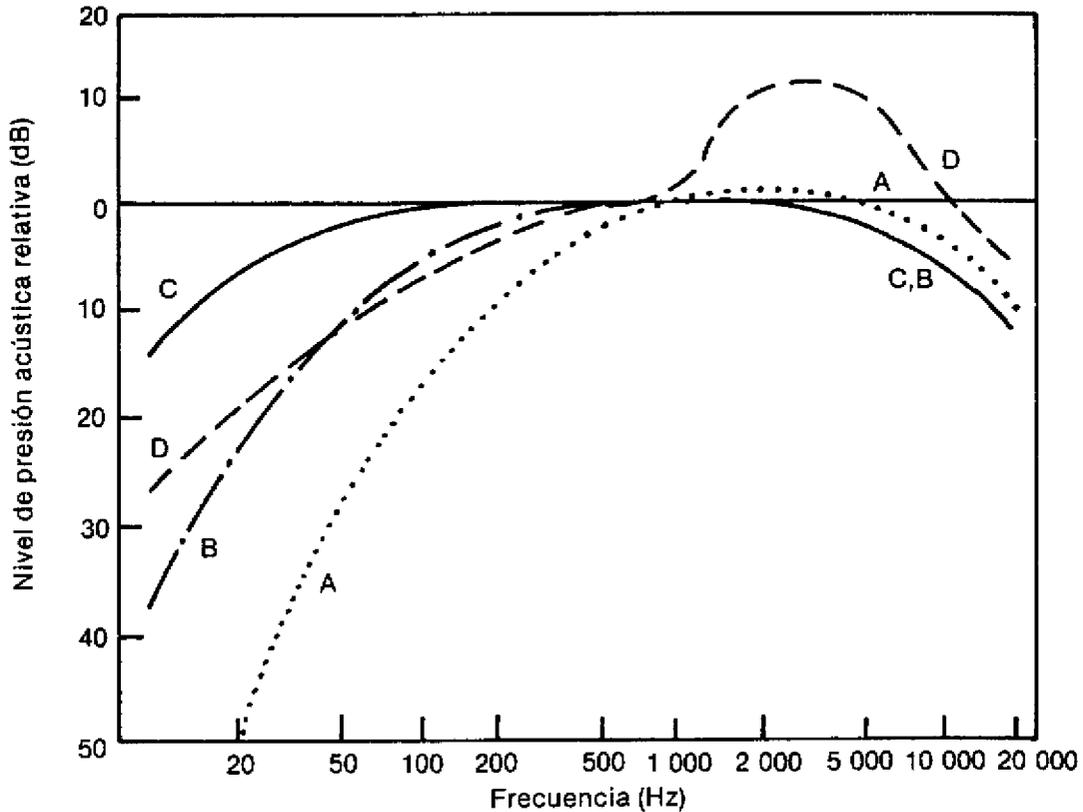
Con el propósito de diseñar un aparato que lograra igualar el comportamiento del oído, basándose en las curvas de isosonoridad, se pensó en la necesidad de introducir en los medidores del nivel de presión sonora (sonómetros) un filtro de corrección o atenuación, que pudiera aproximar su respuesta a la forma de actuar del oído humano. De esta manera se obtuvieron cuatro escalas de ponderación.

La escala A está diseñada como atenuador similar al oído cuando soporta niveles de presión bajos, dentro de una gama amplia de audio frecuencias; la escala B representa la atenuación para niveles intermedios; y la escala C para niveles elevados. Finalmente, la escala D corresponde a niveles de presión sonora sumamente elevados, es decir, por encima de los 115 dB (re: 20µPa), por ejemplo el ruido que producen las turbinas de avión.

La figura 12.5 ilustra gráficamente lo anterior.

Figura 12.5

Características de los filtros A, B, C y D, usados en sonómetros normalizados (1)



(1) De acuerdo con las publicaciones número 179 y 179-A, del Comité Internacional de Electrotecnia, 1973.

Al observar la figura anterior, de escalas de atenuación se aprecia que en las bajas frecuencias la red de ponderación A, denominada $aB(A)$ atenúa en forma importante las bajas frecuencias de 1 kHz, en donde la escala A deja de atenuar. Entre uno y 5 kHz, de acuerdo con las curvas isosónicas se puede decir que la escala A amplifica; después de este último valor, vuelve a atenuar.

La escala B es menos severa $dB(B)$ en cuanto a la atenuación en las bajas frecuencias, sin que se produzca aumento a lo largo del espectro audible. Entre los 400 Hz y los 3 kHz, esta escala se comporta en forma plana, sin atenuaciones.

La escala C ($dB(C)$), es la que produce menor atenuación, ya que entre los 100 Hz y los 3 kHz su incidencia de abatimiento es nula.

Finalmente, la escala D ($dB(D)$), tiene un comportamiento similar al de la B, entre los 500 Hz y 1 kHz; pero produce un aumento importante, superior al de la escala A, entre 1 y 10 kHz.

Cuadro 12.2

Atenuaciones en diversos centros de banda

Frecuencia Hz	Red de Ponderación		
	A	B	C
10	- 70.4	- 38.2	- 14.3
12.5	- 63.4	- 33.2	- 11.2
16	- 56.7	- 28.5	- 8.5
20	- 50.5	- 24.5	- 6.2
25	- 44.7	- 20.4	- 4.4
31.5	- 39.4	- 17.1	- 3.0
40	- 34.6	- 14.2	- 2.0
50	- 30.2	- 11.6	- 1.3
63	- 26.2	- 9.3	- 0.8
80	- 22.5	- 7.4	- 0.5
100	- 19.1	- 5.6	- 0.3
125	- 16.1	- 4.2	- 0.2
160	- 13.4	- 3.0	- 0.1
200	- 10.9	- 2.0	0
250	- 8.6	- 1.3	0
315	- 6.6	- 0.8	0
400	- 4.8	- 0.5	0
500	- 3.2	- 0.3	0
630	- 1.9	- 0.1	0
800	- 0.8	0	0
1 000	0	0	0
1 250	+ 0.6	0	0
1 600	+ 1.0	0	- 0.1
2 000	+ 1.2	- 0.1	- 0.2
2 500	+ 1.3	- 0.2	- 0.3
3 150	+ 1.2	- 0.4	- 0.5
4 000	+ 1.0	- 0.7	- 0.8
5 000	+ 1.5	- 1.2	- 1.3
6 300	- 0.1	- 1.9	- 2.0
8 000	- 1.1	- 2.9	- 3.0
10 000	- 2.5	- 4.3	- 4.4
12 500	- 4.3	- 6.1	- 6.2
16 000	- 6.6	- 8.4	- 8.5
20 000	- 9.3	- 11.1	- 11.2

Existen dos teorías, que dan origen a dos criterios diferentes para estimar valores sonoros en el ambiente laboral: 1) el de equipresión, utilizado por la *Occupational Safety and Health Act* de los Estados Unidos de América; y 2) el de equinergia, utilizado por la Organización Internacional para la Normatización.

El criterio de la OSHA establece que el valor máximo del nivel sonoro, cuando el ruido es estable, debe ser de 90 dB(A); y que cada aumento de 5 dB(A) sumados al valor permisible para ocho horas, debe ocasionar una disminución de la mitad del tiempo de exposición, como se muestra en el cuadro 12.3.

Cuadro 12.3

Criterio de la OSHA sobre exposición al ruido estable

Nivel sonoro dB(A)	Tiempo de exposición
90	8 h
95	4 h
100	2 h
105	1 h
110	30'
115	15'

Esta tabla obedece a la ecuación siguiente:

$$T = \frac{16}{2^{\left(\frac{NS - 85}{5}\right)}} \dots \text{ec (12.14)}$$

donde:

T = tiempo de exposición

NS = nivel sonoro en dB(A)

Sea porque es muy difícil mantener el ruido en un nivel continuo, o porque la labor obliga al operario a desplazarse, la realidad es que existen variaciones importantes, por lo que, para combinar los diferentes niveles, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \dots + \frac{C_n}{T_n} \leq 1 \dots \text{ec (12.15)}$$

donde:

C_i = tiempo permisible de exposición a los niveles 1, 2, ... n

T_i = Tiempo real de exposición a los niveles 1, 2, ... n.

por su parte, la ISO utiliza el cuadro siguiente:

Cuadro 12.4

Criterio ISO de exposición al ruido estable

Nivel sonoro dB(A)	Tiempo de exposición
90	8 h
93	4 h
96	2 h
99	1 h
102	30 ⁻
105	15 ⁻

que obedece a la ecuación siguiente:

$$T = \frac{16}{2^{\left(\frac{NS - 87}{3}\right)}} \dots \text{ec (12.16)}$$

Para calcular la exposición durante una semana, la ISO utiliza el Nivel Sonoro Continuo Equivalente, al cual define como: "el nivel sonoro en dB(A) que, si estuviera presente durante cuarenta horas por semana, daría el mismo índice compuesto de exposición al ruido que los distintos niveles sonoros medidos en una semana". Por otra parte, define el Índice Parcial de Exposición al Ruido como: "el índice determinado por un nivel sonoro y su duración durante una semana laboral de cuarenta horas"; y el Índice Compuesto de Exposición al Ruido, como: "la suma de los índices parciales de exposición a todos los niveles sonoros, durante una semana de cuarenta horas".

Los índices parciales de exposición al ruido, para niveles sonoros entre 80 y 120 dB(A) y duraciones de 10 minutos a 48 horas por semana (dado que en muchos países latinoamericanos se trabaja semanas laborales de 48 horas), figuran en el cuadro 12.5.

Cuadro 12.5

Indices parciales de exposición al ruido.
Duración de 10 minutos a 48 horas

Duración semanal		Indices parciales de exposición al ruido										
Horas	Minutos	Nivel de presión sonora en dB(A) (Punto de medio de la clase)										
		80	85	90	95	100	105	110	115	120		
	10					5	15	40	130	415		
	12					5	15	50	160	500		
	14					5	20	60	185	585		
	16					5	20	65	210	665		
	18					10	25	75	235	750		
	20					10	25	85	265	835		
	25				5	10	35	105	330	1 040		
	30				5	15	40	125	395	1 250		
	40				5	15	55	165	525	1 670		
	50				5	20	70	210	660	2 080		
	60				10	25	80	250	790	2 500		
	70				10	30	90	290	920	2 920		
	80				10	35	105	330	1 050	3 330		
	90				10	40	120	375	1 190	3 750		
	100				15	40	130	415	1 320	4 170		
2					15	50	160	500	1 580	5 000		
2.5					20	65	200	625	1 980	6 250		
3				10	25	75	235	750	2 370	7 500		
3.5		5	10	30	30	90	275	875	2 770	8 750		

(Continúa)

(Continuación)

Duración semanal		* Índices parciales de exposición al ruido										
Horas	Minutos	Nivel de presión sonora en dB(A) (Punto de medio de la clase)										
		80	85	90	95	100	105	110	115	120		
4			5	10	30	100	315	1 000	3 160	10 000		
5			5	15	40	125	395	1 250	3 950	12 500		
6			5	15	45	150	475	1 500	4 740	15 000		
7			5	20	55	175	555	1 750	5 530	17 500		
8			5	20	65	200	630	2 000	6 320	20 000		
9			5	25	70	225	710	2 250	7 110	22 500		
10		5	10	25	80	250	790	2 500	7 910	25 000		
12		5	10	30	95	300	950	3 000	9 490	30 000		
14		5	10	35	110	350	1 110	3 500	11 000			
16		5	15	40	125	400	1 260	4 000	12 600			
18		5	15	45	140	450	1 420	4 500	14 200			
20		5	15	50	160	500	1 580	5 000	15 800			
25		5	20	65	200	625	1 980	6 250	19 800			
30		10	25	75	235	750	2 370	7 500	23 700			
35		10	30	90	275	875	2 770	8 750	27 700			
40		10	30	100	315	1 000	3 160	10 000	31 600			
44		10	35	110	350	1 100	3 500	11 000				
48		10	40	120	395	1 200	3 950	12 000				

Estos valores fueron calculados mediante la ecuación siguiente:

$$E_i = \frac{\Delta t_i}{40} 10^{0.1(NS-70)} \dots \text{ec (12.17)}$$

donde:

E_i = Índice parcial de exposición al ruido en dB (A)

Δt_i = Tiempo a la semana expuesto al nivel i

NS = Nivel sonoro correspondiente al tiempo i semanal en dB (A)

El índice compuesto de exposición al ruido y su relación con el nivel sonoro continuo equivalente, se calculan mediante la fórmula:

$$NSCE = 70 + 10 \log \Sigma E_i \dots \text{ec (12.18)}$$

donde:

NSCE = Nivel sonoro continuo equivalente

E_i = Índice parcial de exposición al ruido en dB (A).

el cuadro 12.6 presenta esta relación:

Cuadro No. 12.6

Relación entre el índice compuesto de exposición al ruido y el nivel equivalente de ruido continuo

Índice compuesto de exposición	Nivel equivalente de ruido continuo dB (A)
10	80
15	82
20	83
25	84
30	85
40	86
50	87

(Continúa)

(Continuación)

Indice compuesto de exposición	Nivel equivalente de ruido continuo dB (A)
60	88
80	89
100	90
125	91
160	92
200	93
250	94
315	95
400	96
500	97
630	98
800	99
1.000	100
1.250	101
1.600	102
2.000	103
2.500	104
3.150	105
4.000	106
5.000	107
6.300	108
8.000	109
10.000	110
12.500	111
16.000	112
20.000	113
25.000	114
31.500	115

Finalmente, la misma recomendación ISO-R-1999 (1975) presenta, en el cuadro 12.7, el riesgo que corre el trabajador de sufrir una hipoacusia a diferentes niveles de exposición, con respecto a los niños de exposición laboral.