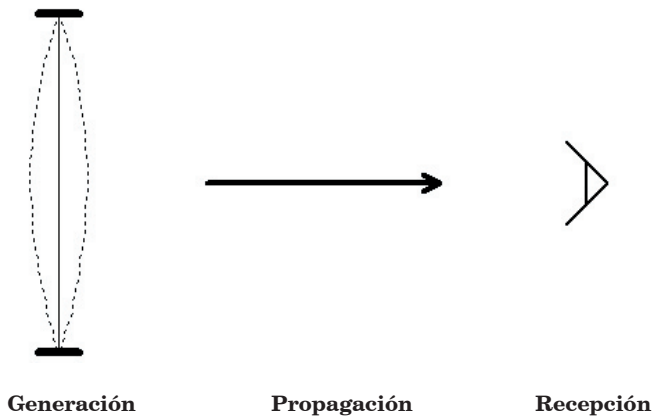


## APLICACIONES DE LA ACÚSTICA EN LA INGENIERÍA<sup>1</sup>

Ing. ALBERTO HUGO PUPPO  
Académico de Número



La Acústica trata el sonido bajo tres aspectos básicos: generación, propagación y recepción.

El sonido se genera por la vibración de un cuerpo (sólido o fluido) en un rango de frecuencias denominado *rango audible*. Esta vibración se transmite al medio fluido (aire, agua, etc.) que rodea a dicho cuerpo. Al vibrar el medio, el sonido se propaga a través de él y es receptado por el oído (seres humanos, animales) o por elementos mecánicos (micrófonos). Otro aspecto, más reciente, es el “almacenamiento” del sonido y la posibilidad de su reproducción automática.

<sup>1</sup> Resumen de la conferencia pronunciada en la Sesión Plenaria Ordinaria del 4 de junio de 2007.

En el desarrollo de cada aspecto de la Acústica han intervenido matemáticos y físicos prominentes. A modo de breve síntesis, cabe mencionar los siguientes:

*Generación del sonido:*

- Siglo VI a.C.: Pitágoras (unicordio, concepto de armonía).
- 1630: Galileo Galilei (distinción del sonido como un fenómeno vibratorio, frecuencia).
- 1760: Bernoulli, D'Alembert, Euler (teoría de vibraciones mecánicas).
- 1800: Lagrange, Fourier (descomposición armónica de vibraciones periódicas).
- 1870: Rayleigh (tratamiento completo: experimentación y teoría).

*Propagación del sonido:*

- 1660: Boyle (experimento para demostrar que no se propaga en el vacío).
- 1670: Borelli, Viviani (mediciones de la velocidad de propagación en el aire).
- 1700: Newton (teoría de ondas acústicas aunque con una errónea evaluación de la velocidad en el aire al considerar a ésta como un medio elástico).
- 1816: Laplace (correcta evaluación de la velocidad al admitir un comportamiento adiabático del aire).
- 1820: Poisson (teoría de las ondas estacionarias).
- 1842: Doppler (efecto sobre la frecuencia aparente del sonido generado por una fuente móvil).
- 1860: von Helmholtz (aspectos teóricos y experimentos con resonadores para detectar las componentes armónicas).

*Recepción del sonido:*

- 1550: Ingrassia, Eustachio, Fallopio, Du Verney, Cotugno, Valsalva, Meckel, Corti, Von Békésy, Davis ... (estudio del oído humano).
- 1830 a 1890: Savart, Koenig, von Helmholtz (límites de las frecuencias audibles).
- 1843: Ohm (análisis de notas musicales y precisión de términos tales como altura, timbre, color del sonido).
- 1860: Upham (distinción de los campos directo y reberverante).
- 1860: Weber, Fechner (fundadores de la sicoacústica).
- 1870: Rayleigh (definición precisa de la escala musical temperada).
- 1900: Sabine (concepto de tiempo de reverberación y su aplicación en la acústica arquitectónica).

*“Almacenamiento” del sonido:*

- 1877: Edison (cilindros, fonógrafo acústico).
- 1925: Victor Talking Machine (grabación eléctrica de discos).
- 1930: Marconi (grabación en alambre magnético).
- 1945: Mullin (cintas magnéticas).
- 1948: Bell Laboratories y otros (discos estéreo-fónicos).
- 1966: Dolby (reducción de ruido en las grabaciones).
- 1970 en adelante: Digitalización y compresión del sonido (CD, memorias sin partes móviles, archivos avi, mp3, etc.).

La ecuación diferencial correspondiente a una onda acústica plana (tubo) que se propaga en el aire se obtiene a partir de la ecuación de equilibrio,

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

donde  $x$  es la coordenada espacial,  $t$  el tiempo,  $p$  el cambio de presión en relación a la atmosférica,  $u$  el desplazamiento de las partículas y  $\rho_0$  la densidad del aire. Considerando que el cambio de volumen es,

$$V = V_0 \frac{\partial u}{\partial x}$$

y que tiene lugar una transformación adiabática,

$$p = - \frac{p_0 \gamma}{V_0} V, \quad \gamma = 1.4$$

la ecuación de equilibrio se transforma en la ecuación de onda,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

siendo  $c$  la velocidad de propagación dada por,

$$c^2 = \frac{P_0 \gamma}{\rho_0}$$

siendo  $\rho_0$  la presión atmosférica. Con esta ecuación se obtiene un valor de la velocidad coincidente con el determinado experimentalmente (340 m/s a 20 °C de temperatura y presión atmosférica normal).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

Análogamente, en términos del cambio de presión se tiene la ecuación de onda.

En el caso de que se considere una disipación de energía durante la propagación, la ecuación de onda es

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \alpha \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

y, si en lugar de una onda plana, se trata de una onda tridimensional la ecuación de propagación es

$$\nabla^2 p + \alpha \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

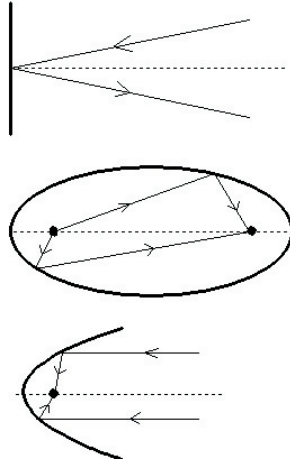
En la denominada Acústica Teórica se obtienen soluciones de estas ecuaciones de onda en diversos casos de interés técnico. En particular, la solución para la onda armónica plana se expresa como

$$p = p^* \operatorname{sen} \left[ \frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T} \right], \quad c = \lambda f, \quad f = \frac{1}{T}$$

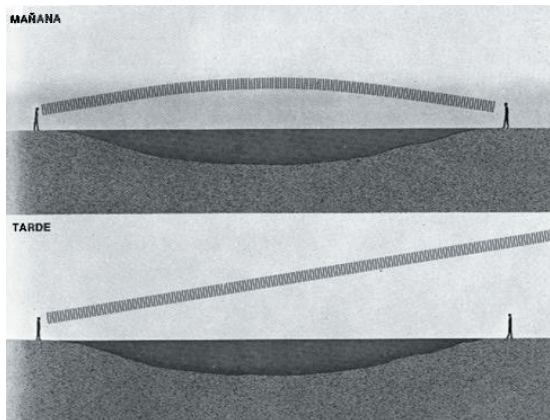
Siendo  $p^*$  la amplitud,  $\lambda$  la longitud,  $f$  la frecuencia y  $T$  el período de la vibración del aire al propagarse el sonido. Para presión y temperatura normales, con la relación entre  $c$ ,  $\lambda$  y  $f$ , se obtienen los valores

$f$ (1/s)	62.5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\lambda$ ( $\mu$ )	5.44	2.72	1.36	0.68	0.34	0.17	0.09	0.04

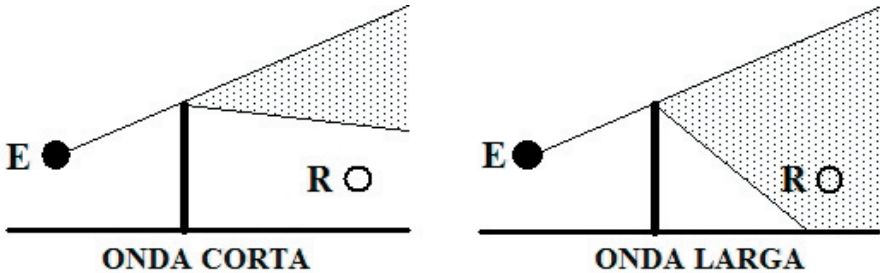
Las ondas acústicas se reflejan cuando inciden sobre cuerpos rígidos de acuerdo con la forma de estos (plana, elíptica, parabólica) dando lugar a interesantes estudios y aplicaciones técnicas (recintos, antenas de captación).



Las ondas acústicas también se refractan. Un interesante fenómeno ocurre cuando dos personas ubicadas a uno y otro lado de un espejo de agua intentan hacerse oír. Es probable que lo consigan a primera hora de la mañana, cuando el aire sobre el agua está más frío, y por lo tanto más denso, que el aire a mayor altura. A medida que se homogeniza la temperatura, la refracción se disminuye y aumenta la dificultad de las personas para hacerse oír.



La difracción de las ondas sonoras es importante en el estudio de problemas técnicos. Por ejemplo, la eficiencia de una barrera acústica para disminuir la intensidad del sonido, generado por un emisor **E**, en el lugar del receptor **R**, depende de la longitud de onda. Si ésta es corta, la zona de “penumbra” originada por la difracción (esquemáticamente indicada en las figuras mediante un sombreado) no abarca, en este caso, al receptor. En cambio, para una onda larga la zona de “penumbra” es más amplia y contiene al receptor.



A continuación se definen algunas magnitudes frecuentemente empleadas en la Acústica:

*Densidad de energía sonora*, en  $N m / m^3$ :

$$D(t) = \frac{(p^*)^2}{\rho_0 c^2} \left[ \text{sen} \left( \frac{2 \pi x}{\lambda} - \frac{2 \pi t}{T} \right) \right]$$

*Densidad efectiva o medida*, en  $N m / m^3$ :

$$D_{medida} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} D(t) dt = \frac{p_{ef}^2}{\rho_0 c^2}, \quad p_{ef} = \frac{p^*}{\sqrt{2}}$$

*Intensidad sonora*,  $N / ms$ :

$$I = D_{medida} C$$

*Potencia sonora*, en  $N / ms$  o  $W$  (watts), con  $S$  área del frente de onda:

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

*Nivel de potencia sonora, en dB (decibeles):*

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_{ref}}, \quad W_{ref} = 10^{-12} W$$

*Nivel de presión sonora, en dB (decibeles):*

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_{ref}^2}, \quad p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} Pa$$

Empleando las ecuaciones anteriores, se establece la relación entre los niveles de potencia y presión sonoras,

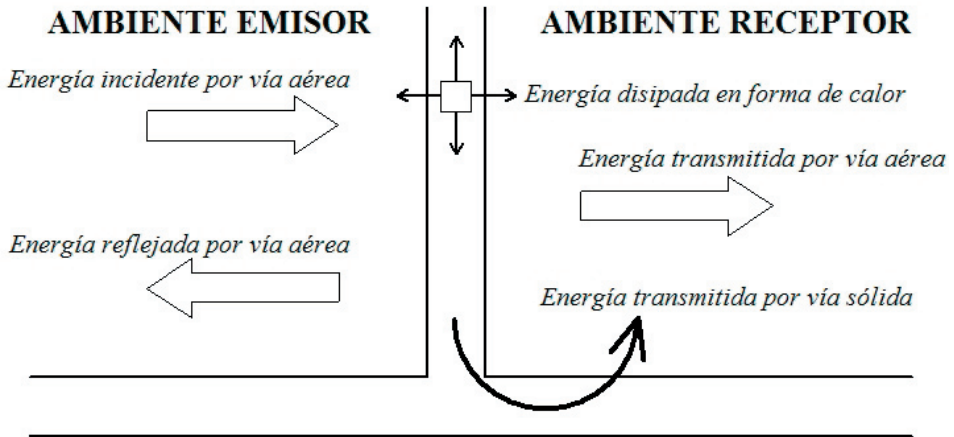
$$L_p = L_W - 10 \log S + 0.1$$

En la tabla siguiente se dan valores de nivel y potencia sonora generados por diversas fuentes:

Fuente	$L_w$ (dB)	$W$ (W)
<i>Turborreactor</i>	160	$10^4$
<i>Orquesta a pleno</i>	130	$10^1$
<i>Martillo percutor</i>	120	$10^0$
<i>Radio a alto volumen</i>	110	$10^{-1}$
<i>Automóvil en autopista</i>	100	$10^{-2}$
<i>Voz a gritos</i>	90	$10^{-3}$
<i>Conversación normal</i>	60	$10^{-6}$
<i>Susurro</i>	30	$10^{-9}$

Es interesante destacar que la energía sonora emitida por 60.000 personas gritando al unísono es de sólo 60 W.

En el estudio del control de ruido se analiza la distribución de la energía sonora emitida en un ambiente a fin de evaluar la que llega al receptor ubicado en un ambiente contiguo.



Para evaluar las distintas potencias sonoras (energías en la unidad de tiempo) es conveniente definir los coeficientes adimensionales,

$$\delta = \frac{\text{Potencia disipada}}{\text{Potencia incidente}}$$

$$\alpha = \frac{\text{Potencia absorbida}}{\text{Potencia incidente}}$$

$$\tau = \frac{\text{Potencia transmitida}}{\text{Potencia incidente}}$$

$$r = \frac{\text{Potencia reflejada}}{\text{Potencia incidente}}$$

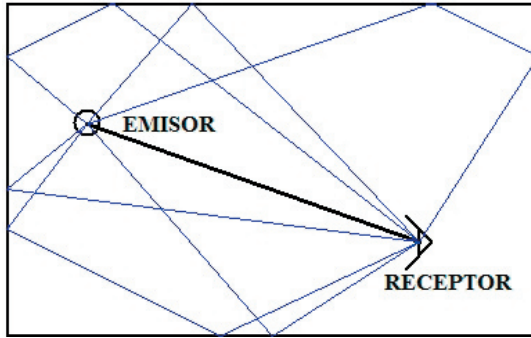
que dependen de las dimensiones y características acústicas de los ambientes emisor y receptor. Si se trata de controlar el ruido en el ambiente emisor debe maximizarse el coeficiente de absorción  $\alpha$  de este ambiente mediante el tratamiento acústico de sus paredes, piso y cielorraso. En cambio, para reducir el ruido en el ambiente receptor es fundamental maximizar el coeficiente de transmisión  $\tau$  aumentando la masa del tabique divisorio.

Del balance de energía sonora surgen las siguientes relaciones entre los coeficientes:

$$\alpha = \delta + \tau, \quad r + \delta + \tau = r + \alpha = 1$$

En los recintos cerrados es necesario distinguir entre la onda que llega directamente del emisor al receptor (*campo directo*) y las que lo hacen luego

de reflejarse una o más veces en las paredes, piso y cielorraso (*campo reverberante*).



En este caso, la relación entre los niveles de potencia y presión sonora es

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q_\theta}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_T} \right) + 0.1$$

donde  $4\pi r^2$  es la superficie esférica del frente de onda,  $Q_\theta$  el factor de direccionalidad (vale 2 si el frente es hemisférico) y  $R_T$  la constante de absorción del recinto dada por

$$R_T = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} S$$

siendo  $\bar{\alpha}$  el coeficiente medio de absorción,

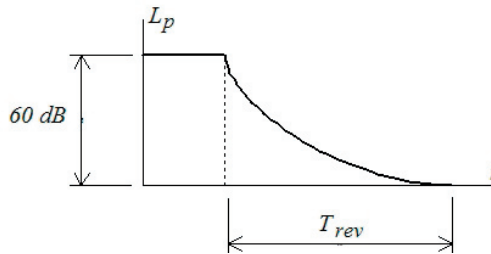
$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S}$$

calculado con las áreas y los coeficientes de absorción de las paredes, piso y cielorraso del recinto.

A título de ejemplo, se indican los coeficientes de absorción en función de la frecuencia para dos tipos de superficie:

$f$ (1/s)	125	250	500	1000	2000	4000
Hormigón a la vista	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Cielorraso acústico	0.10	0.22	0.73	0.88	0.75	0.67

El denominado *tiempo de reverberación clásico*  $T_{rev}$  se define como el tiempo que tarda un sonido en disminuir en 60 dB su nivel de presión sonora. Su valor



es de gran importancia en la evaluación del comportamiento acústico de un recinto, según sea su destino. Analíticamente,  $T_{rev}$  está dado por

$$T_{rev} = \frac{6}{\mu c \log e - \frac{cS}{4V} \log(1 - \bar{\alpha})}, \quad e = 2.7183, \quad \mu \cong 0.01$$

indicándose con  $S$  la superficie total del recinto (paredes, piso y cielorraso) y con  $V$  su volumen.

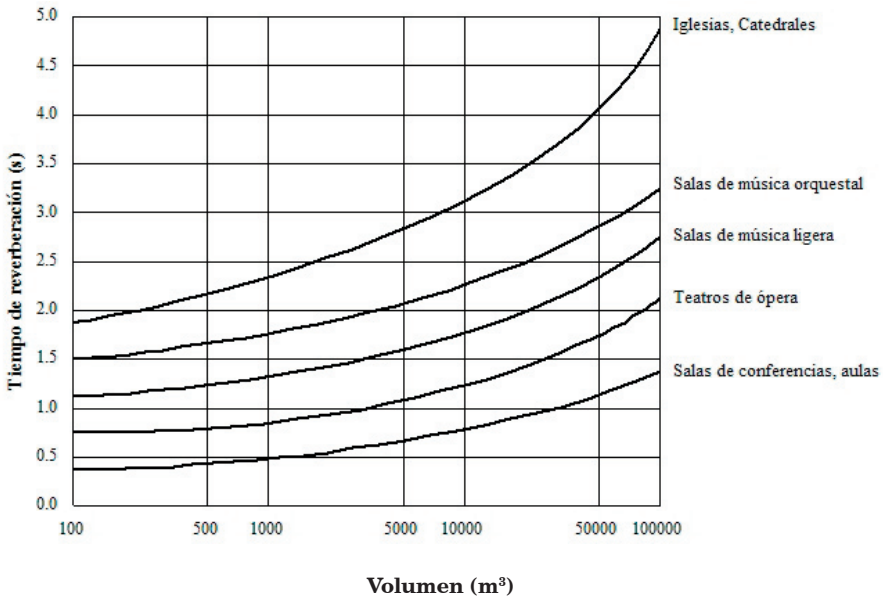
Por ejemplo, en un recinto de 17 x 10 x 3 m con 60 personas sentadas en su interior, se obtiene:

- Sin tratamiento acústico:  $T_{rev} = 1.80 \text{ s}$
- Con cielorraso acústico:  $T_{rev} = 0.40 \text{ s}$
- Disminución de nivel sonoro:  $\Delta L_p = 8.8 \text{ dB}$

El tiempo de reverberación es el parámetro más empleado para calificar la calidad acústica de un recinto, según sea su empleo. En una sala de conferencias o en un aula se requiere que el tiempo de reverberación sea breve a fin de que las palabras no queden “flotando”, superponiéndose entre sí, dificultando de esta

manera su comprensión. Por el contrario, en una catedral es conveniente que el tiempo de reverberación sea amplio para obtener un efecto de magnificencia con el sonido del órgano y el canto coral religioso.

Con el correr de los años se han desarrollado criterios sicoacústicos para establecer el tiempo de reverberación más adecuado en recintos de variados usos y volumen. Como en toda cuestión sicoacústica, intervienen aspectos subjetivos que varían entre las personas que hacen las evaluaciones de la calidad acústica. En la figura siguiente se muestran las curvas correspondientes a uno de los criterios más empleados.



La *sensación sonora*, o sea, la percepción de intensidad del sonido que tienen las personas, depende del nivel de presión sonora y de la frecuencia del sonido. Para obtener aproximadamente dicha sensación se introduce una corrección  $\Delta L_{pA}$  en  $L_p$ , dependiente de la frecuencia, que se denomina *compensación A*:

$f$ (1/s)	62.5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\Delta L_{pA}$ (dB)	-26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0	+1.2	+1.1	-1.1

El nivel sonoro compensado  $L_{pA}$  se expresa en decibeles A y se relaciona con  $L_p$  mediante la expresión

$$L_{pA} (dBA) = L_p (dB) + \Delta L_{pA} (dB)$$

En el listado siguiente se dan valores indicativos del nivel  $L_{pA}$  para varias situaciones:

Jet militar al separarse del carrier, a 15m:	130 dBA
Avión jet durante el despegue, a 60m:	118 dBA
Remachadora pesada, en taller:	110 dBA
Boeing 707 durante despegue, a 1800 m:	108 dBA
Boeing 707 durante apeoximación, a 1800 m:	97 dBA
Impresora de diario, en taller:	97 dBA
Motocicleta, a 7 m:	90 dBA
Licuada, en cocina:	85 dBA
Camión pesado, 90 km/h, a 15 m:	84 DBA
Autopista, a 50 m del bode del pavimento:	76 dBA
Música, en living:	76 dBA
Audio de TV, aspiradora, en interiores:	70 dBA
Condensador de aire acondicionado, a 5 m:	55 dBA
Canto de pájaro, a 10 m:	42 dBA

Los niveles tolerables de confort acústico responden a una sensación sicoacústica subjetiva. En la lista siguiente se dan valores indicativos de estos niveles cuando el receptor se mantiene en silencio:

Estudio de música:	32 dBA
Residencias (dormitorios):	35 dBA
Oficinas privadas :	37 dBA
Bibliotecas:	42 dBA
Oficinas en general:	45 dBA
Aulas:	48 dBA
Restaurantes:	55 dBA

El oído humano es el órgano que capta el sonido y lo transforma en una sensación. La capacidad del oído indica que se trata de un finísimo instrumento con sorprendentes cualidades de análisis. Mediante la captación estérea de ambos oídos es posible ubicar la dirección de donde provienen las ondas sonoras (parte física) y también, a través de un proceso selectivo, puede aislarse relativamente un sonido de particular interés (parte sicoacústica subjetiva).

Cuando se trata de evaluar el deterioro del órgano auditivo humano es necesario tener en cuenta dos factores: uno, el nivel sonoro compensado expresado

en dBA y otro, la duración del sonido (o, más propiamente, del ruido). Cuando se tienen diversos niveles de varias duraciones, la evaluación se basa en el denominado *nivel sonoro continuo equivalente* expresado en dBA. En intervalos de duración  $\Delta T_i$  se tienen potencias sonoras

$$W_i = W_{ref} 10^{\frac{L_{Wi}}{10}}$$

En el intervalo total  $T = \sum_i \Delta T_i$  el órgano auditivo absorbe una energía sonora

$$E = \sum_i W_i \Delta T_i$$

de modo que la potencia sonora media es  $W = E/T$ . El nivel sonoro continuo equivalente resulta

$$L_{W,eq} = 10 \log \frac{W}{W_{ref}}$$

Como se miden niveles de presión sonora en lugar de niveles de potencia, se tiene  $L_{p,eq}$  en lugar de  $L_{W,eq}$ . El instrumento que efectúa directamente esta medición se denomina “Integrating Sound Level Meter” o, simplemente, *dosímetro*.

Existen numerosas disposiciones reglamentarias para evaluar la acción del ruido sobre las personas en diversas circunstancias.

En lo referente al *comfort*, la Norma IRAM 4062 de nuestro país permite calificar los ruidos molestos al vecindario. Para determinar si un ruido originado por una nueva fuente emisora (por ejemplo, un establecimiento industrial) es molesto al vecindario, se mide el nivel equivalente del ruido en varios horarios (diurnos, nocturnos) con la nueva fuente detenida ( $L_{eq}$  fondo) y con la fuente en funcionamiento pleno ( $L_{eq}$  medido) y se aplica el siguiente criterio de calificación:

$$L_{eq} \text{ medido} - L_{eq} \text{ fondo} \leq 8 \text{ dBA} \Rightarrow \text{No molesto}$$

El *deterioro auditivo progresivo* que pueden experimentar los trabajadores industriales está contemplado en la Ley N° 19587/79 de Higiene y Seguridad del Trabajo, Decreto N° 295/2003, que establece como condición básica un ni-

vel sonoro continuo equivalente de 85 dBA para una jornada de 8 horas. Para duraciones distintas, se fijan los siguientes niveles:

<i>Duración</i>	<i>Leq (dBA)</i>
8 <i>hs</i>	85
4 <i>hs</i>	88
2 <i>hs</i>	91
1 <i>hs</i>	94
30 min	97
15 min	100
7.5 min	103
3.75	106
1.88	109
0.94	112
28.12 seg	115

Así, por ejemplo, se tolera un nivel de 100 dBA durante 15 minutos. Además, se establece un límite de 115 dBA cuando no se usa un protector auditivo, aun cuando sea un ruido de cortísima duración. El límite máximo maximorum es de 135 dBA, independientemente de la protección que se emplee.