

# Sobre niveles límites para la protección de la audición (\*)

Andrés Lara Saenz (\*\*)

## Introducción

La función más importante del sentido auditivo es el análisis de frecuencia que permite resolver sonidos complejos en sus frecuencias componentes. El sistema de transducción de energía electro-mecánica que inicia la actuación filtrante en el oído interno es un proceso muy complejo y no bien conocido. Su agudeza exige una actuación filtrante neuronal secundaria en el micromecanismo de la cóclea, basada en una función activa de las células ciliares (Evans, 1986). La acción filtrante de la cóclea es vulnerable fisiológicamente. El deterioro del filtrado y, en consecuencia, de la función auditiva, tiene

relación con la degradación de las células ciliadas, especialmente en las exteriores. La figura 1, según Evans y Hamson (1976), indica la correlación entre la pérdida de agudeza de las curvas del umbral de frecuencia (FTC), en la gama de alta frecuencia, y la proporción de células ciliares interiores (IHC) y exteriores (OHC) remanentes en la cóclea de un oído de una cobaya que se ha lesionado con Canamicina.

Entre otras causas, la sobreexposición a vibraciones mecánicas del órgano de Corty debida a ruido intenso ha demostrado que modifica la integridad de las células ciliares.

Los ambientes industriales, siendo uno de los lugares más comunes en donde la gente se expone a niveles intensivos de ruido, exigen reglas y legislación para la protección de la salud, incluyendo efectos fisiológicos y físicos y, sobre todo, la protección auditiva.

En este trabajo se analiza la correlación entre los parámetros

físicos de exposición al ruido (nivel, espectros y distribución temporal) con el daño al oído en cuanto a la adopción de límites de protección contra el ruido.

## Daño y Deterioro Auditivos

La Academia Americana de Otorrinolaringología ha definido el Deterioro Auditivo como "un daño suficiente para perjudicar la eficiencia de una persona en las actividades de la vida cotidiana". Para simplificar este amplio concepto, se ha adoptado como una práctica realista relacionar el deterioro con la inteligibilidad del habla normal, principalmente porque el deterioro de la función analítica de la cóclea impide reconocer sonidos complejos como las consonantes del habla. Una simplificación adicional se agrega al evaluar la inteligibilidad del habla en términos de audiometría tonal.

(\*) Este trabajo fue presentado al 8º Simposium FASE 89 "Acústica Ambiental", celebrado en abril de 1989 en Zaragoza.

(\*\*) Doctor Ingeniero. Presidente de la Sociedad Española de Acústica. Miembro del Consejo asesor científico de FASE.

El daño se mide en decibelios de Nivel de Audición con relación al Umbral de Audibilidad Normal a frecuencias audiométricas especificadas (500 a 4000 Hz). El cambio de umbral producido por una exposición al sonido, se distingue en permanente (PTS, Permanent Threshold Shift) o temporal (TTS, Transitory Threshold Shift), según la recuperación con el tiempo después de la exposición.

El deterioro se define en términos de la diferencia entre el nivel

individual permanente de audición y el 'límite inferior' que es una curva empírica que, teóricamente, marca el límite entre 'ninguna dificultad' y 'alguna

dificultad' en cuanto a la comprensión del habla normal. Es una línea de fiabilidad relativa para relacionar la audiometría tonal con la comprensión del habla (Noble, 1978).

TABLA I

FRECUENCIA DE PRUEBA	NIPTS (dB): PORCENTAJE		
	50%	20%	10%
1000	10	20	30
2000	15	30	45
3000	20	40	60

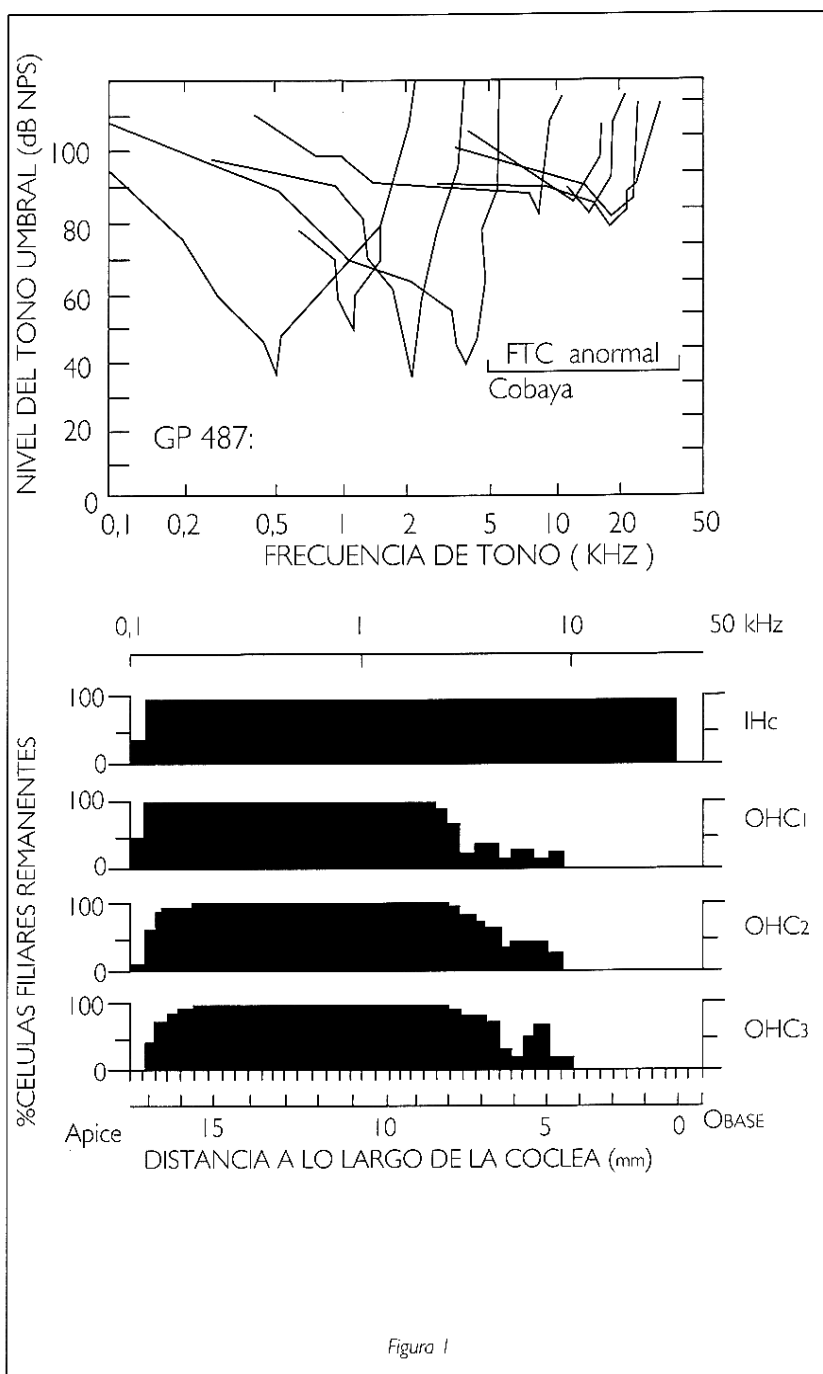


Figura 1

### Riesgo de Daño

El riesgo de daño a una exposición de sonido se define en términos del porcentaje de la diferencia media de daño a la audición entre grupos comparables expuestos y no expuestos.

Cuando se evalúa el daño a la audición debido a una exposición concreta al sonido, como es el caso de ambientes industriales, hay que eliminar otros factores concurrentes:

- Presbiacusia, o acción de la edad,
- Socioacusia, o exposición al sonido fuera del ambiente industrial, como el de la vida ordinaria, y
- Nosoacusia, factores perjudiciales otológicos tales como sustancias químicas, drogas, enfermedades, etc.

El daño producido por el ruido se refiere entonces como NIPTS o NITTS (Noise Induced). En el caso del ruido industrial, las abreviaturas van precedidas por una I (INIPTS o INITTS).

### Criterios de Daño

Con referencia al deterioro producido por el ruido o el sonido en general, el primer paso es definir la referencia cero de daño auditivo. Hay una concordancia general entre

## Límites para exposición a ruido constante

Los datos sobre INIPTS tienen que ser retrospectivos, principalmente basados en encuestas sobre audición en industrias con niveles de ruido estables o constantes.

Stevens y col. (1953) recogieron datos sobre sordera profesional. El Comité ASA 224-X2, analizando datos industriales, descubrieron varias correlaciones útiles, como las publicadas en el informe "Las relaciones entre pérdida de audición y exposición al ruido" (N.Y. 1954).

Algunos de los descubrimientos principales en este campo se describen a continuación:

- Las pérdidas de audición debidas a exposición al ruido (E.R.) tienden a ser máximas en la gama 3-6 KHz para cualquier exposición dada (un máximo de 4 KHz generalmente puede ser debido a exposición al ruido).
- Para la comprensión del habla, solamente son importantes las

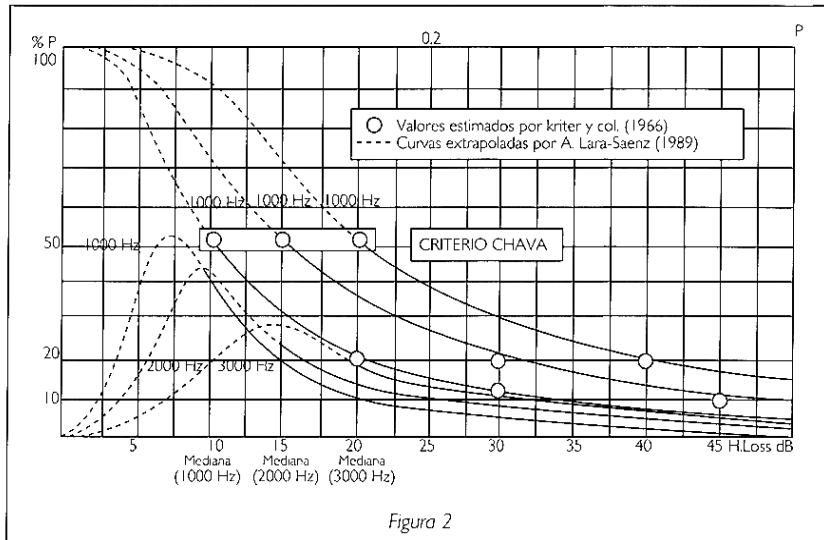


Figura 2

distintos criterios al definir las pérdidas de audición por la media aritmética en dB de la pérdida a tres o cuatro frecuencias fijadas (500 Hz, 1, 2 o aún 3 o 4 KHz), el daño empieza a valores que varían entre 15 y 25 dB (por ejemplo CHABA, 15 dB; ANSI, 25 dB; ISO 25 dB; etc.). Estas pérdidas se consideran aceptables respecto a la línea empírica de la comprensión del habla.

Hay que tener en cuenta que cuando se intenta proteger a los individuos contra el daño auditivo, todos los límites y los criterios se remiten al nivel medio de la población expuesta, es decir, el valor que divide la población en dos mitades con las mismas probabilidades de tener más o menos pérdidas que tal valor. Las peligrosas desviaciones de este valor se deben principalmente a la susceptibilidad individual a la exposición al ruido, un problema que exige pruebas de inspección para detectar tales personas.

En cuanto a las desviaciones descritas en estudios epidemiológicos nos referimos a la tabla I que reproduce valores correspondientes a los percentiles de 50, 20 y 10, dados por Kryter y Ward (1966), basados en Glorig y Nixon (1961) y Rudmose (1957). Las curvas extrapoladas por el autor, de distribuciones de nivel en la figura 2 a 1000, 2000 y 3000 Hz, y las curvas acumulativas correspondientes,

muestran una distribución asimétrica con un valor medio muy distinto de los valores modales y de mediana.

Según estos datos, sería posible encontrar, después de varios años de exposición, un 10% de las personas con pérdidas de 60 dB a 3000 Hz en un ambiente considerado aceptable, porque su valor promedio es de 20 dB.

Una vez tenido en cuenta este hecho importante, todos los criterios de daño al oído se remiten al valor promedio de la población.

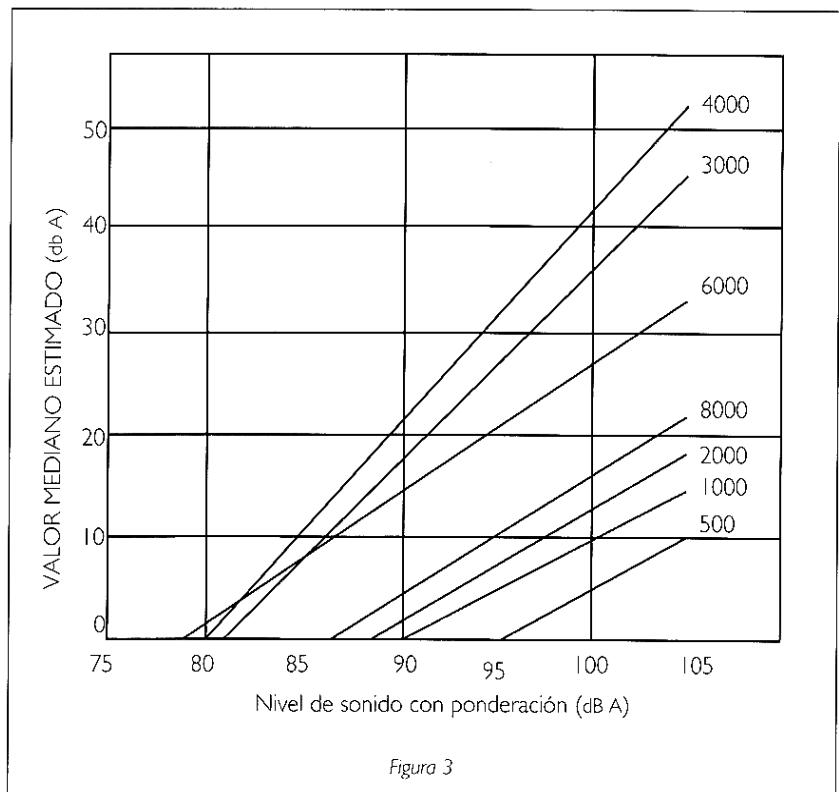


Figura 3

pérdidas de audición en la gama 0,5-2 KHz.

- Las pérdidas de audición a frecuencias inferiores a 500 Hz generalmente son menores o iguales a las de 500 Hz, pero las pérdidas a frecuencias superiores a 2000 Hz pueden ser mayores que la pérdida a 2 KHz.
- La susceptibilidad individual se refleja en pérdidas a frecuencias superiores a 2 KHz.
- La pérdida de audición no es una imagen del espectro de ruido.
- Dentro del espectro del ruido se puede elegir una banda de octava (octava indicadora) que se corresponde mejor con las pérdidas de audición.
- Los niveles de ruido inferiores a 1000 Hz son más importantes en cuanto a pérdida con respecto al habla.
- La distribución de las pérdidas de audición en grupos expuestos al ruido tiene una extensión mayor que la de no expuestos (Este hecho es importante para evaluar los datos obtenidos en ferias mundiales).

La encuesta realizada por Passchier-Vermeer (1968) se considera representativa de INIPTS en trabajadores expuestos durante 8 horas diarias durante muchos años, con una buena regresión lineal con niveles en dBA, o con curvas N.R., o aun con la

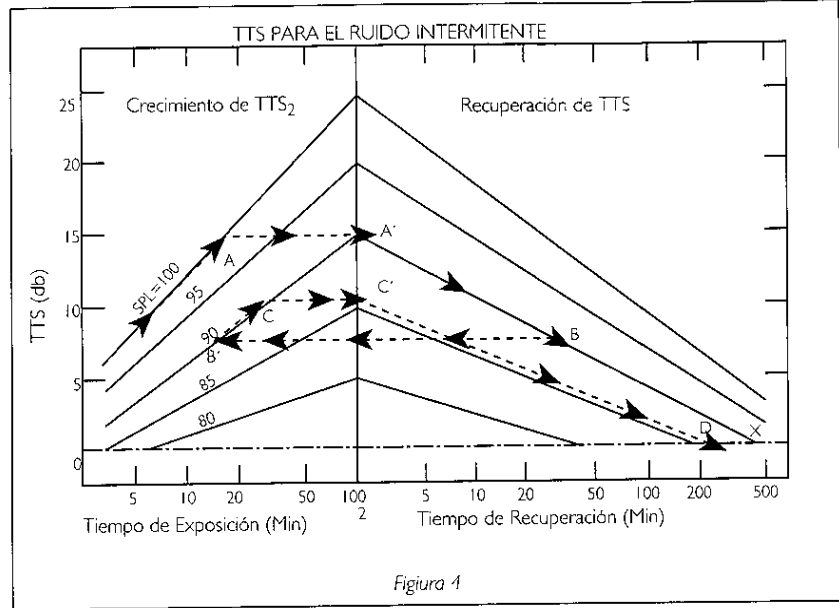


Figura 1

integral de la presión sonora (Kraak, 1979).

Debido a la simplicidad, además de la fiabilidad, los niveles en dBA se han adaptado de forma generalizada para establecer los límites de exposición al sonido.

La encuesta de Passchier-Vermeer incluye el INIPTS en función de diversas frecuencias para diez o más años de exposición a niveles constantes de ruido en dBA, con curvas de regresión también lineales pero con pendientes y valores distintos (figura 3).

Se observa que hay un riesgo mayor para la audición a frecuencias altas, y como las frecuencias relacionadas con la inteligibilidad del habla (500, 1000 y 2000 Hz) so-

lamente están influidas por niveles superiores a 90 dBA. Este hecho legitima el valor previamente mencionado de los criterios de daño para el deterioro.

Se observa también que 80 dBA es un valor bajo y 85 dBA un valor aceptable, ya que puede producir menos de 10 dBA de pérdida y esto solamente a frecuencias más altas.

No obstante, hay que recordar que estos valores son INIPTS intermedios estimados y que se pueden producir desviaciones significativas individuales.

Se puede concluir que los valores comprendidos entre 85 y 90 dBA son límites razonables para exposición al ruido de nivel constante para una jornada de 8 horas, durante 10 o más años.

### Límites para la exposición a niveles de ruido variables en el tiempo

Datos sobre INIPTS correspondientes a exposición a altos niveles de ruido que varían con el tiempo son casi inexistentes o muy incompletos. Las pruebas realistas requieren trabajo de laboratorio, donde se pueden utilizar niveles de ruido controlados y distribuciones

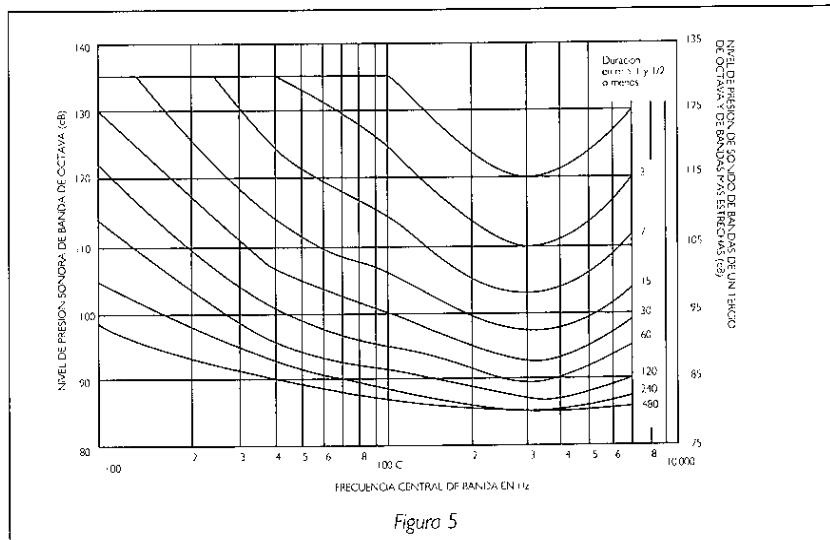


Figura 5

TABLA II

TIEMPO DE EXPOSICION	N° INTERVALOS DE EXPOSICION EN 8 HORAS						
	1	3	7	15	35	75	150
8 h.	90	—	—	—	—	—	—
6 h.	91	92	93	94	94	94	94
4 h.	93	94	95	96	98	99	100
2 h.	96	98	100	103	106	109	112
1 h.	99	102	105	109	114	—	—
30'	102	105	110	114	—	—	—
15'	105	110	115	—	—	—	—
8'	108	115	—	—	—	—	—
4'	111	—	—	—	—	—	—

temporales en la realización de experimentos para determinar Cambios de Umbral Transitorios.

Las experiencias de laboratorio con altos niveles intermitentes solamente se realizan con animales. El problema adicional es extrapolar de TTS a PTS y de animales a personas.

**Crecimiento y recuperación de TTS: Criterios de riesgo de daño de CHABA**

El CHABA (Comité sobre Audición, Bioacústica y Biomecánica de la Academia de Ciencias de USA) propuso en 1966 una serie de curvas de nivel de Criterios de Riesgos de Daño (DRC) para exposiciones continuas e intermitentes a ruido constante (Kryler et al., 1966; Ward, 1970) basado en los tres siguientes supuestos principales:

- a) La exposición al ruido se considerará aceptable si se produce en el trabajador medio un PTS inferior a 10 dBA a 1 KHz o menos, 15 dBA a 2 KHz o 20 dBA a 3 KHz y superiores.
- b) El PTS después de 10 o más años de ER no excederá el TTS2 generado por una exposición de un solo día (Para simplificar se asumía que eran iguales).
- c) Todas las exposiciones que

producen un TSS2 dado serán igualmente peligrosas.

Utilizando los datos sobre TTS, incluso pruebas de laboratorio intensivas, se utilizaron los siguientes resultados para deducir el CHABA DRC:

1. En exposición diaria, la recuperación de cambios de umbral temporales en menos de 16 horas no producirán efecto acumulativo que resulte en un PTS.
2. Las curvas de recuperación han demostrado que TTS2, es decir, el cambio de umbral medido 2 minutos después del cese de la exposición al ruido, es una buena indicación del TTS producido por cualquier exposición a ruido particular. Se han propuesto otros tiempos de recuperación (30 a 50 minutos), pero en la mayoría de los casos el TSS2 actúa como un índice significativo.
3. El desarrollo y la recuperación del TTS2 son exponenciales (figura 4; Ward, 1970).
4. Para un nivel constante de ER, se alcanza un valor asintótico de TTS2 en 8-12 horas.
5. El crecimiento del TTS2 con el nivel de ER es aproximadamente lineal, una vez que ha llegado a un NPS definido como 'silencio efectivo' (alrededor de 75 dB en

bandas de octavas). Por debajo de este valor, no aparece ningún TTS2 significativo (el silencio efectivo es independiente de la frecuencia, pero los crecimientos de TTS2 aumentan con la frecuencia).

Los niveles por encima del 'silencio efectivo' se refieren como Nivel Efectivo (NE) (Ward y col. 1976). Por consiguiente, una ER constante de 95 dB (NE = 20 dB) producirá dos veces más TTS2 que una de 85 dB (NE = 10 dB).

Utilizando todos estos resultados y eligiendo curvas medias (figura 4) para el crecimiento y la recuperación del TTS2, los contornos de riesgo de daño de CHABA para una ER constante dan los niveles límites de dB de NPS en bandas de octavas y 1/3 bandas de octavas que no deben ser excedidas durante 10 o más años para exposiciones únicas que varían entre 8 horas y medio minuto o menos (figura 5, Kryter y col., 1966).

El ruido de banda-ancha sigue los criterios de la banda más alta que alcanza las curvas de contorno. Si otras bandas exceden los contornos, la pérdida de audición cubrirá una gama más ancha de frecuencias, siendo cada zona más afectada por una banda aproximadamente media octava por debajo.

Para exposiciones a niveles de ruidos intermitentes, la influencia del tiempo de exposición en las curvas de CHABA y los valores de los intervalos están basados principalmente en el hallazgo de que para un nivel fluctuante o para interrupciones rápidas (menos de cinco minutos) el TTS2 está en proporción con la media aritmética del ER. (El mismo TTS se generará por 8 horas de ER a 85 dB que por 4 horas a 95 dB o por un ruido aleatorio con una media de 10 dB sobre 25 dB).

Este criterio comparado con la teoría de la energía total (aumento de 3 dB cada vez que el tiempo se reduce a la mitad) permite un mayor aumento de niveles cuando el tiempo de

de niveles cuando el tiempo de exposición se reduce. Un nivel de 95 dB actuando alternativamente en periodos de 'presencia' y 'ausencia' generará el mismo TTS2 que uno continuo de  $75 + (95 - 75)/2 = 85$  dB, es decir, una diferencia de 10 dB, en lugar de 3 dB.

Además, la diferencia entre ambos criterios varía con la razón de 'tiempo de presencia' al 'tiempo de presencia más tiempo de ausencia', llamada la regla de la fracción de tiempo presente (Ward, 1970).

La teoría de la inmisión total de Robinson (1966) asocia el riesgo con la energía total ponderada A, indistintamente de la distribución de tiempo en la semana laboral. Es una extensión de la teoría de la energía total, basada solamente en los datos de medidas sobre exposición continua.

### Impulsiones cortas y largas de ruido

Se han establecido una serie de curvas de contorno para impulsiones de ruido de corta duración (menos de

dos minutos) que relacionan el tiempo de exposición total diario con el NPS para diferentes fracciones de 'presencia' y para frecuencias de centro de banda distintas del ER (figura 6). Para una banda centrada en 1000 Hz y una impulsión con un tiempo de presencia de 1' con una fracción de 'presencia' de 0,5', el nivel máximo para 2 horas de exposición diaria será 106 dB.

Para impulsiones de tiempo de 'presencia' mayores, la influencia de los tiempos de crecimiento y de recuperación conduce a otra serie de curvas que relacionan la duración de la impulsión de ruido con el tiempo de recuperación para diferentes bandas de frecuencias (figura 7).

Una impulsión de tiempo de 'presencia' de 10' de una banda de octava de ruido centrada en 1000 Hz con un nivel de 106 dB, necesitará 15 minutos de tiempo de recuperación entre impulsiones, a un nivel máximo dado por el límite para 8 horas de exposición continua (figura 5), es decir, 86 dB en este caso.

El ruido de impulso no se incluyó, pero se obtuvo evidencia de que la exposición repetida a impulsos

sonoros por encima de 140 dB (200 Pa) podía producir en algunas personas un daño significativo.

Las curvas de contorno de CHABA (DRC) tienen el mérito de poder cuantificar la influencia del tiempo de crecimiento y de recuperación de cambios temporales de umbral de audición y relacionar bastante bien el TTS2 medible diario con el PTS de exposición a largo plazo. En cuanto a la aplicación práctica, tiene la dificultad de medir los niveles en bandas de frecuencia. Se introdujo una buena simplificación cuando se obtuvieron indicios que demostraban que el riesgo de daño correlaciona bien con el nivel global de ruido en dBA. Se puede observar que las curvas DRC para exposición a ruido constante (figura 5) se aproximan a la forma de la curva A. En base a esto se da en la tabla II simplificados valores máximos de dBA en función del tiempo total de exposición y, además, número de intervalos.

### Norma ISO

La norma 1999 de la ISO (1975) 'Valoración de la exposición profesional al ruido para la conservación de la audición', está basada en el concepto de energía total, asumiendo que una pérdida de audición de 25 dB (media aritmética de PTS a 500, 1000 y 2000 Hz), no representa un daño.

Los índices parciales  $E_i$  de exposición al ruido se dan para exposiciones semanales  $\Delta t_i$  a niveles distintos  $L_i$  (dBA), por la expresión:

$$E_i = \Delta t_i / 40 \cdot 10^{(L_i - 70) / 10}$$

El índice compuesto es  $E_c = \sum E_i$  y su relación con el nivel continuo equivalente es  $Leq = 70 + 10 \log E_i$ .

Una tabla (ISO, 1999) da el porcentaje de riesgo de daño para  $Leq$  de 80 a 115 dBA y 5 a 45 años de exposición diaria.

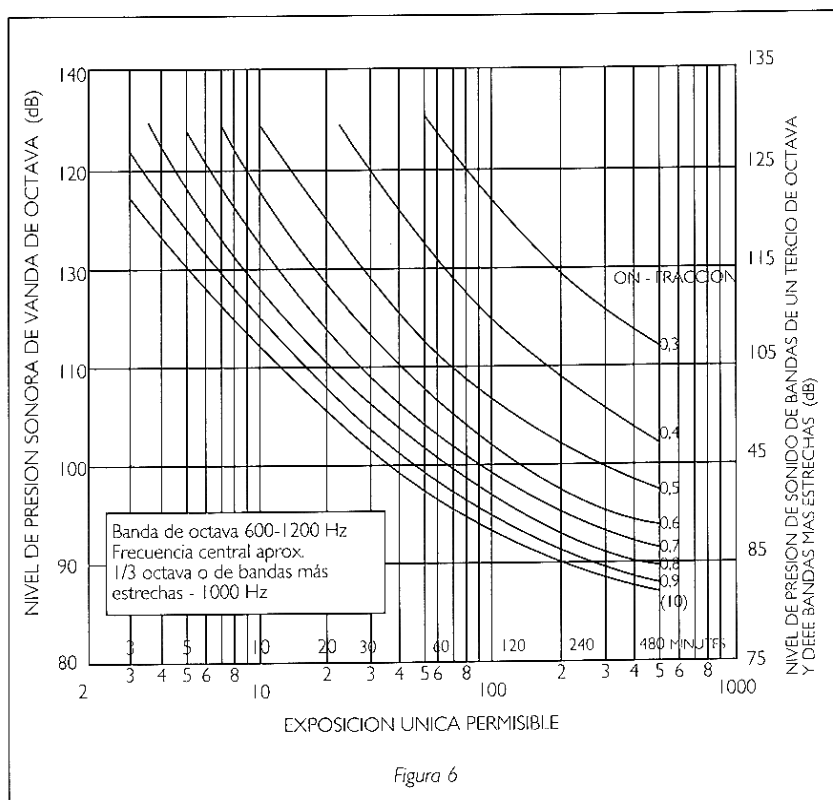


Figura 6

## Valor límite umbral

Una simplificación adicional es la introducida por NIOSH (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional de EE.UU.) para el TLV (Valor Límite Umbral) como una función del tiempo de exposición, deducida de la expresión:

$$T_{\max} = \frac{16}{2(L-80)/5}$$

Para exposición diaria intermitente ( $T_i$ ) a niveles distintos ( $L_i$ ), la condición adicional es:

$$\sum \frac{T_i}{(T_{\max})_i} \leq 1$$

Este criterio también permite valores más altos que el de igual energía, por ejemplo, 5dBA en lugar de 3dBA, cada vez el tiempo se reduce a la mitad. Se adoptó en EE.UU. en 1971, siendo corregida después la fórmula, concretamente 85 dBA en lugar de 80 dBA (Walsh-Heatey Act, Anon 1969).

Para ruido de impulso (crestas a intervalos mayores de un minuto) la siguiente tabla incluye el número de impulsos diarios en una función del nivel de cresta.

TABLA III (NIOSH)

dB	IMPULSOS/DIA
140	100
130	1.000
120	10.000

## Directiva de la CEE 86/188

Finalmente, concluimos con la Directiva que el Consejo de la CEE puso en circulación en 1986, después de varios años de trabajo de ar-

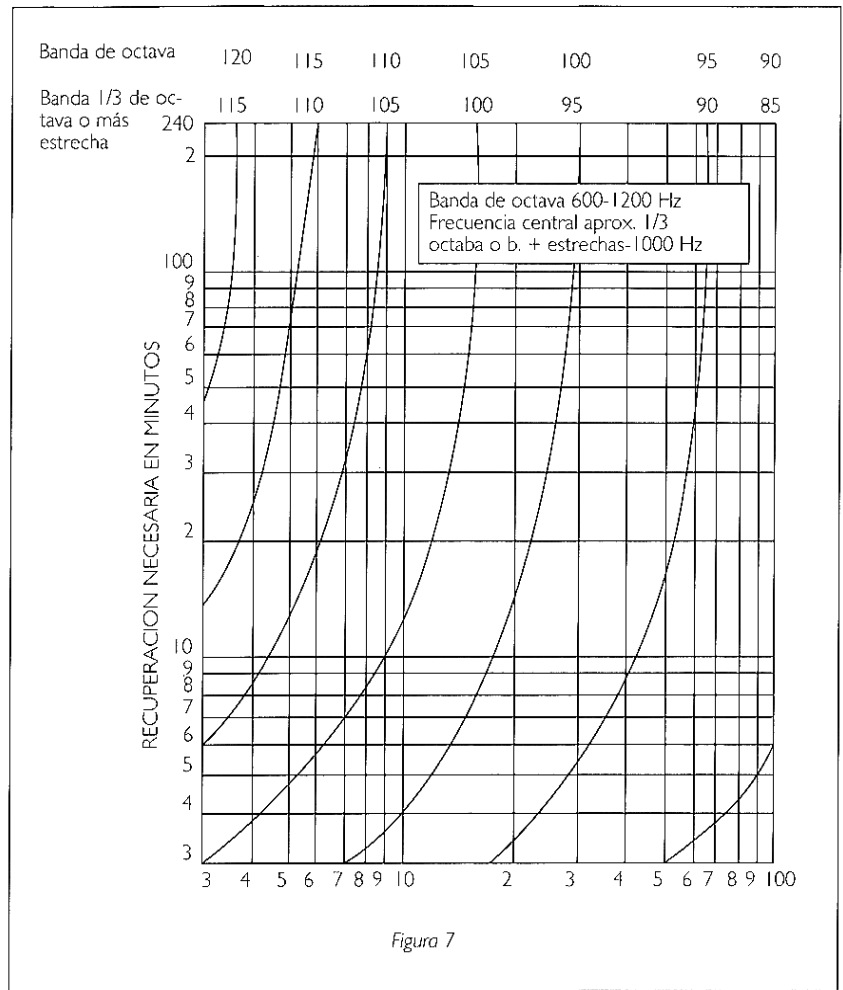


Figura 7

monización, para proteger los trabajadores frente al daño auditivo derivado de la exposición al ruido en ambientes laborales.

La directiva refiere todas las reglas y recomendaciones al nivel diario equivalente de exposición al ruido en dBA.  $L_{EPD}$  se da por:

$$L_{EP,D} = 10 \log \left[ \frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} \frac{pA^2}{p0^2} dt \right] + 10 \log \frac{T_e}{T_0}$$

$$= L_{Aeq} \left[ T_e + 10 \log \frac{T_e}{T_0} = 10 \log \right]$$

$$\left[ \sum_{i=1}^m (L_{A_i})^{1/10} \right] + 10 \log \frac{T_e}{T_0}$$

donde:

$pA$  = valor instantáneo de la presión acústica con ponderación 'A'

$P_0$  = presión acústica cero de referencia: 20  $\mu Pa$

$T_e$  = tiempo de exposición diario

$T_0$  = tiempo de exposición diario de referencia: 8 horas

Para  $n$  días laborables semanales, el nivel semanal equivalente es,

$$L_{EP,W} = 10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_{EP,d})^{n/10} \right]$$

Todas las reglamentaciones y recomendaciones se refieren a  $LEP_d$ , siendo las más significativas:

- Para  $LEP_d \geq 85$  dBA o  $P_{inst} \geq 200$  Pa ( $L = 140$  dB), hay que informar a los trabajadores sobre la situación (Artículo 4º) y disponer de protectores auditivos (Artículo 6º).
- Si  $LEP_d \geq 90$  dBA, las zonas ruidosas tiene que ser señaladas,

se deben investigar las causas, establecer programas de control (Artículo 5º) y es obligatoria la utilización de protectores de oídos (Artículo 6º).

## Conclusiones

- No es posible definir límites de seguridad absolutos para la exposición al ruido en el sentido amplio de que todos serán protegidos. Los valores límite se refieren a valores medios de las poblaciones. Las grandes desviaciones del valor intermedio se deben a susceptibilidad personal que exige pruebas previas especializadas de inspección.
- Los límites para la exposición al ruido constante continuo pueden basarse bastante bien en los datos epidemiológicos sobre INIPTS, incluyendo evaluaciones

estimadas de Presbiacusia, Noso y Socioacusia. Estos límites también concuerdan con los derivados en experiencias de TTS de laboratorio.

- El concepto de energía total se aplica bastante bien cuando se comparan las exposiciones constantes continuas de distintas duraciones. Para niveles intermitentes o fluctuantes los límites son demasiado conservadores comparados con los de la teoría temporal (CHABA) debido a la capacidad de recuperación de TTS del mecanismo de audición, por lo menos para impulsiones de menos de cinco minutos (para impulsiones de más tiempo, las curvas de CHABA se apartan de los últimos datos que demuestran que la recuperación a la exposición repetida sigue líneas

cuasi paralelas en lugar de líneas convergentes (figura 4), es decir, la recuperación se prolonga a lo largo de la exposición diaria).

- La relación entre los efectos temporales y permanentes de la exposición al ruido está lejos de ser bien conocida, en cuanto a definir los límites de seguridad, principalmente para la exposición al ruido intermitente y fluctuante.
- La directiva de la CEE sigue el criterio de energía total con límites de nivel razonables con aplicabilidad factible y evaluación relativamente fácil utilizando instrumental actual de medida de ruido.
- Hace falta más investigación tanto para relacionar PTS con TTS como para extrapolar experiencias con animales a reacciones humanas.

## Referencias Bibliográficas

Anon (1969). U.S. Federal Register, vol. 34, nº 96.

Evans, E. F. and Harrison, R. V. (1976) -Correlation between outer hair cell damage and deterioration of cochlear nerve tuning properties in the guinea pig-, *Journal of Physiology*, 256, pp. 43-44.

Evans, E. F. (1986) -Recent advances in understanding hearing mechanism, in A. Lara-Sáenz and R.W.B. Stephens (ed.)-, *Noise Pollution SCOPE 24* John Wiley and Sons, Chichester, UK.

Glorig, A., Ward, W.D., and Nixon, J. (1961) -Damage Risk Criteria and Noise Induced Hearing Loss-, *Arch. Otolaryngology*, vol. 74, pp. 413-423.

Kraak, W. (1979) -Integration of Temporary Threshold Shift for Permanent Threshold Shift-, in *Noise as a public Health Problem*, ASHA Report nº 10, pp. 92-96.

Kryter, K.D., Ward, W.D. et al. (1966) -Hazardous Exposure to Intermittent and Steady Noise-, *Journ. Ac. Soc. Am.*, vol. 39-3, pp. 451-461.

Passchier - Vermeer, W. (1968) -Hearing Loss Due to Exposure to Steady-State Broadband Noise-, IG-TNO Report 35, Delft.

Robinson, D.W. -The Relationships between Hearing Loss and Noise Exposure-, *Nat. Phys. Lab. Aer. Rep. AC 32*, Teddington UK.

Ridmose, W. (1957) -Hearing Loss Resulting from Noise Exposure-, in G.M. Harris (ed.) *Handbook of Noise Control*, McGraw-Hill Book Co. Inc, N.Y.