



Introducción teórica:

Experimentalmente se comprueba que las variaciones de sensación sonora no son proporcionales a las variaciones de intensidad del sonido que llega al oído. Es decir, si al oído llegan dos estímulos tales que uno es el doble que el otro, las dos sensaciones que inducen no guardan la misma proporción entre ellas. De hecho, el estímulo (E) y la sensación (S) están relacionados por la llamada ley de Weber-Fechner, que se expresa por la ecuación:

$$S = k \cdot \log E \quad (1)$$

Derivando esta ecuación se comprueba que las variaciones de sensaciones son proporcionales a los incrementos relativos (dE) de los estímulos:

$$dS = k \frac{dE}{E} \quad (2)$$

Por eso, en acústica se utiliza una escala de intensidades relativas, utilizando como unidad el Belio, que se define como el incremento que corresponde a una relación de intensidades de 1:10, es decir:

$$1 \text{ Belio} = \log \frac{10I_i}{I_i} \quad (3)$$

Lo que implica que el número de Belios, correspondiente a una relación de intensidades I_2/I_1 , se determina mediante la expresión:

$$n^{\circ} \text{ de Belios} = \log \frac{I_2}{I_1} \quad (4)$$

En consecuencia, se define una escala logarítmica que relaciona intensidades relativas. Entonces, eligiendo una intensidad de referencia $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (que aproximadamente corresponde al umbral de percepción de un sonido de frecuencia 1000 Hz) se obtiene una escala absoluta de intensidades dada por:

$$L_i = \log \frac{I_i}{I_0} \quad (5)$$

Así, los valores extremos son:

Máximo (M):

$$L_M = \log \frac{I_M}{I_0} = \log \frac{100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} = 14 \text{ Belios} \quad (6)$$

Mínimo (m):

$$L_m = \log \frac{I_0}{I_0} = \log 1 = 0 \text{ Belios} \quad (7)$$

De esta manera se obtiene una escala de niveles de intensidad acústica comprendido entre 0 y 14 Belios, que es un intervalo menor que si se utilizara una escala en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (de 10^{-12} a 10^2). De todas formas, como el Belio es una unidad demasiado grande para las intensidades acústicas normales, la unidad que se utiliza de forma general es el decibelio (dB) que es la décima parte del Belio. En consecuencia, el nivel absoluto de una intensidad I_i expresado en dB será:



$$L_i = 10 \cdot \log \frac{I_i}{I_0} \quad (8)$$

La expresión del nivel de intensidad puede adoptar distintas formas en función de los parámetros que intervienen en su medida. Así, se puede expresar en función de la potencia de la fuente (W), de la distancia (r) o de la presión (p), de forma que:

$$L_i = 10 \cdot \log \frac{I_i}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{W_i/4\pi r^2}{W_0/4\pi r^2} = 10 \cdot \log \frac{W_i}{W_0} = 10 \cdot \log \frac{p_i^2/\rho c}{p_0^2/\rho c} = 20 \cdot \frac{p_i}{p_0} \quad (9)$$

Operaciones con niveles acústicos en decibelios

Como la unidad dB tiene un carácter logarítmico, para operar con magnitudes que están expresadas en dB hay que observar ciertas precauciones, relacionadas con las operaciones logarítmicas. La intensidad sonora I_t resultado de varias fuentes I_i se puede calcular directamente mediante $I_t = \sum I_i$. Teniendo en cuenta que la definición de los logaritmos dice que $a = \log b \Leftrightarrow 10^a = b$, podemos expresar la relación $L_i \Leftrightarrow I_i$ como

$$L_i = 10 \cdot \log \frac{I_i}{I_0} \Leftrightarrow \frac{L_i}{10} = \log \frac{I_i}{I_0} \Leftrightarrow 10^{\frac{L_i}{10}} = \frac{I_i}{I_0} \quad (10)$$

Al pasar a la escala logarítmica, se obtiene lo siguiente:

$$L_t = 10 \cdot \log \frac{I_t}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{\sum I_i}{I_0} = 10 \cdot \log \sum \left(\frac{I_i}{I_0} \right) = 10 \cdot \log \sum 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (11)$$

Por ejemplo, el nivel de intensidad o presión acústica de tres señales de 40, 50 y 60 dB resulta:

$$L_t = 10 \cdot \log(10^4 + 10^5 + 10^6) = 60,45 \text{ dB} \quad (12)$$

Esto supone que el resultado de la suma de varias fuentes sonoras es un nivel acústico muy próximo al de la fuente más intensa.

Índices acústicos

El objetivo de estos índices es valorar de forma cuantitativa la posible molestia que provocan los ruidos ambientales de muy diversa procedencia, y por tanto de intensidades y frecuencias muy variables.

a) Nivel continuo equivalente (L_{eq}):

Cuando se consideran niveles que varían temporalmente $L(t)$, como sería por ejemplo el ruido de tráfico rodado, se utiliza el llamado nivel continuo equivalente (L_{eq}), que se define como el nivel en dB correspondiente al promedio de la cantidad de energía acústica variable durante un periodo de tiempo T , cuya ecuación matemática es:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \right] \quad (13)$$



que se puede calcular de forma aproximada mediante la expresión:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log\left[\frac{1}{T} \sum \left(t_i \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}\right)\right] \quad (14)$$

siendo t_i los tiempos de observación durante los cuales el nivel sonoro L_i se mantiene en un intervalo de $\pm 2 \text{ dB}$.

Ejemplo:

¿Cuál es el nivel continuo equivalente correspondiente al ruido de tráfico observado a lo largo de un día en una determinada calle urbana con la siguiente distribución de niveles sonoros: 85 dB durante 4 horas, 90 dB durante 2 horas, 80 dB durante 10 horas y 65 dB durante 8 horas?

Solución:

$$L = 10 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot 10^{8,5} + 2 \cdot 10^9 + 10 \cdot 10^8 + 8 \cdot 10^{6,5}}{24}\right) = 82,52 \text{ dB} \quad (15)$$

b) Nivel día-tarde-noche (L_{den})

Este criterio se establece a causa de la necesidad de evaluar de diferente forma los niveles de ruido urbano durante el día, la tarde y la noche, penalizando los ruidos nocturnos por estimar que la molestia que producen es mayor. Su valor se calcula con la ecuación:

$$L_{den} = 10 \cdot \log\left[\frac{12 \cdot 10^{L_d/10} + 4 \cdot 10^{(L_e+5)/10} + 8 \cdot 10^{(L_n+10)/10}}{24}\right] \quad (16)$$

donde L_d representa el nivel sonoro equivalente para el periodo de día, L_e para el periodo de tarde y L_n para el periodo nocturno. Para saber exactamente los periodos correspondientes a cada tramo horario, consulta la ordenanza municipal de Toledo, por ejemplo, en su artículo 55.3, o en el Anexo I.A.1.

c) Niveles percentiles

Considerando que el ruido urbano tiene un carácter aleatorio, resulta conveniente usar los índices estadísticos llamados percentiles. Los que más se utilizan son:

- L_{10} : El nivel sonoro en dB que se sobrepasa durante el 10 % del tiempo de observación. Por lo general corresponde a los niveles más elevados
- L_{90} : El nivel sonoro en dB que se sobrepasa durante el 90 % del tiempo de observación. Por lo general corresponde al nivel sonoro de fondo.

d) Índice de ruido de tráfico (TNI)

Es un índice obtenido de la combinación ponderada de L_{10} y L_{90} , promediadas a lo largo de un periodo de tiempo de 24 horas, de manera que:

$$TNI = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30 \quad (17)$$



Objetivo de la práctica

Cálculo de los diversos índices de ruido urbano correspondientes a una serie de medidas de niveles acústicos registrados en la Plaza de Cuba de la ciudad de Toledo. Los valores que se muestran en las tablas proporcionadas corresponden a promedios diezminutales (en dB) a lo largo de una semana.

En un documento word responde a las siguientes cuestiones:

1. Calcula los siguientes índices para cada día de la semana : Nivel continuo equivalente (L_{eq}), nivel día-tarde-noche (L_{den}), junto con los niveles de día (L_d), de tarde (L_e) y de noche (L_n) y el índice de ruido de tráfico (TNI) (además de los percentiles), y anota los resultados en una tabla como la siguiente:

Día	L_{eq}	L_d	L_e	L_n	L_{den}	L_{10}	L_{90}	TNI
Lunes								
Martes								
Miércoles								
Jueves								
Viernes								
Sábado								
Domingo								

2. Comenta estos resultados. Especula sobre las diferencias entre los diferentes valores obtenidos para estos índices, y la posible explicación sobre su evolución a lo largo de la semana. Representa las series temporales directas por si te sirve de ayuda. Intenta encontrar algún otro índice que pudiera expresar algo parecido al TNI. Puedes consultar la normativa/ordenanza de ruido de la ciudad de Toledo en <https://www.toledo.es/wp-content/uploads/2016/11/oca.pdf>, para completar tu análisis y ver si se superan los umbrales marcados o no, y comentarlo en tu documento.