

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

2. FUNDAMENTOS DE LA MEDIDA DE INTENSIDAD SONORA

2.1 INTRODUCCIÓN

Se procede en este capítulo, a contar detalladamente los fundamentos teóricos del campo teórico de la acústica referente a la intensimetría, es decir, a la medida de la intensidad del sonido.

Para ello, previamente se definirán los principales parámetros de la medida del sonido: la potencia, la presión y la intensidad. Tras ello, se ahondará en los principales conceptos básicos de la medición de intensidad acústica y como se han tenido en cuenta a la hora de la realización de los ensayos del proyecto.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PARAMÉTROS ACÚSTICOS

2.2.1 PRESIÓN ACÚSTICA

La presión sonora es el parámetro clásico de medición del sonido en acústica. Durante años se ha determinado si una fuente era más o menos ruidosa según su nivel de presión sonora. La presión sonora viene definida como la diferencia entre la presión instantánea debida al sonido (que es fluctuante) y la presión atmosférica estática. De tal forma que puede representarse por la siguiente expresión:

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{P_{RMS}}{P_{ref}} \text{ dB}$$

(Ecuación 1)

Donde:

P_{RMS} = Presión cuadrática media

P_{ref} = Presión de referencia = $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

El nivel de presión sonora se suele denominar como LPS (SPL en nomenclatura inglesa) además de la forma arriba reflejada. ⁽⁸⁾⁽⁹⁾

Es una magnitud escalar que depende, en exteriores, de la potencia de la fuente, su posición espacial y las condiciones físicas del medio. En interiores, además de esto, depende también, entre otras, de las condiciones del recinto.

Es importante resaltar este carácter escalar de la presión sonora, circunstancia ésta, que aunque proporciona mucha información sobre el riesgo de pérdida auditiva de los usuarios de máquinas, no aporta suficiente información respecto de las causas generadoras del ruido.

2.2.2 POTENCIA ACÚSTICA

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

La potencia sonora es la cantidad de energía por unidad de tiempo que radia una fuente sonora independientemente del entorno. La potencia sonora es un vector, dirigiéndose la radiación hacia las 3 direcciones espaciales (x, y, z) y viene expresada en vatios ($1\text{W} = 1\text{ J/s} = 1\text{ N}\cdot\text{m/s}$). Cualquier máquina tiene una potencia acústica inherente (causa de la existencia de un ruido).

La potencia acústica es la causa del ruido y la presión acústica es el efecto. La caracterización del nivel de ruido que emite una fuente se puede obtener calculando su potencia acústica. Existen dos procedimientos experimentales para determinar la potencia: mediante la medición de la presión o mediante la medición directa de la intensidad sonora. ⁽⁷⁾

2.2.3 INTENSIDAD ACÚSTICA

La intensidad sonora es el flujo de energía promediado en el tiempo por unidad de área, por lo que puede definirse como la potencia sonora por unidad de superficie. La intensidad sonora es un vector, aparte de tener una magnitud (módulo) se mide en un sentido de propagación (el sentido puede ser positivo o negativo)

Por lo tanto, la medida de este parámetro aporta información sobre la cantidad de energía que pasa a través de un área definida, y además, sobre la dirección y sentido en el que fluye la energía. Esta relación puede verse en la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo de energía} = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}} \Rightarrow W = \int_s \overline{I} ds$$

(Ecuación 2)

Si no existiera flujo de energía neto en un punto la intensidad sonora resultaría cero.

La intensidad sonora es un vector que describe la magnitud y dirección del flujo neto de energía acústica a través de una determinada superficie. Por lo tanto, las unidades son de energía por unidad de tiempo y superficie, es decir, W/m^2 .

Su definición depende del campo sonoro en el que se mida. Así pues:

- Campo libre:

$$I = \frac{P_{RMS}^2}{\rho \cdot c} = \frac{W}{S}$$

(Ecuación 3)

-Campo reverberante

$$I = \frac{P_{RMS}^2}{4 \cdot \rho \cdot c}$$

(Ecuación 4)

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Siendo, ρ la densidad del aire en kg/m^3 y c la velocidad del sonido en m/s . El producto de $\rho \cdot c$ representa la impedancia específica del medio donde se propaga el sonido; y su valor en el aire, dependiendo de las condiciones atmosféricas, es aproximadamente de $415 \text{ N}\cdot\text{s/m}^3$.⁽⁹⁾

En siguientes apartados se aclarará la diferencia entre campo libre y campo reverberante.

Frente a la medida de la presión sonora surge la medida de la intensidad sonora, que siendo un parámetro de carácter vectorial, aporta grandes ventajas en el análisis y control de los niveles de ruido de las distintas fuentes.

2.3 RELACIÓN ENTRE PRESIÓN, POTENCIA E INTENSIDAD SONORA

En la siguiente figura se muestra un caso particular de una fuente puntual, en el cual, puede observarse que la intensidad y la presión sonora disminuyen acorde aumenta la distancia existente entre el punto de medición y la posición de la fuente según la ley de cuadrados inverso. Sin embargo, la potencia sonora de la fuente es independiente de la distancia en la que se realice la medición, ya que si bien la intensidad sonora disminuye con el cuadrado de la distancia, la superficie aumenta en igual proporción.

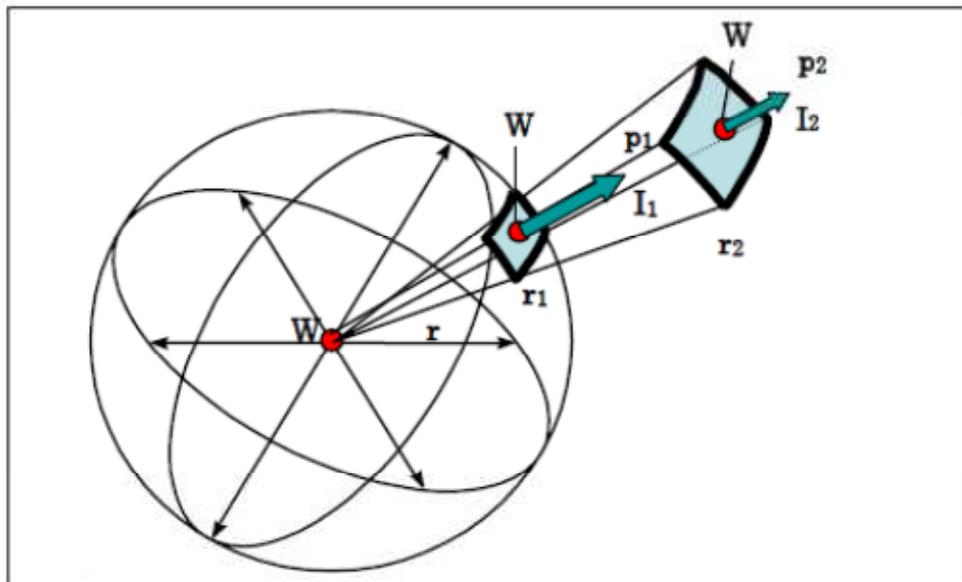


Figura 2. Relación entre presión, potencia e intensidad sonora⁽¹⁰⁾

En acústica, las medidas de presión, intensidad y potencia sonora se expresan en decibelios (dB). El decibelio se define como diez veces el logaritmo decimal del cociente de dos energías de la misma naturaleza y el denominador es una energía de referencia. Salvo que se diga lo contrario, la referencia se pone en el mínimo audible para que el cero corresponda con él. Para el caso de la presión sonora, el denominador de dicho cociente toma el valor de $p=20 \mu\text{P}$, el cual representa la mínima variación de presión sonora respecto de la presión atmosférica que el oído humano puede identificar.⁽⁹⁾ Por lo tanto:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

$$L_p = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{medida}}{20 \mu P} \right)^2$$

(Ecuación 5)

Las magnitudes de referencia de la intensidad y la potencia sonora se determinan, de manera aproximada, a partir del nivel de referencia de la presión sonora medida en condiciones de campo libre. Para esto se igualan los niveles de presión e intensidad sonora, es decir, que en condiciones de campo libre se obtendría el mismo valor en dB tanto para presión como para intensidad sonora. En cambio, cuando el campo sonoro presenta características reverberantes, el valor absoluto del nivel de intensidad sonora activa en dB será menor que el nivel de presión sonora.

Considerando la propagación de una onda sonora en el espacio, así como, dos puntos que cumplan la condición de estar situados uno de ellos al doble de distancia respecto de la fuente que el otro, las intensidades sonoras respectivas:

$$I_{r1} = \frac{W}{4\pi \cdot r_1^2} \qquad I_{r2} = \frac{W}{4\pi \cdot r_2^2}$$

(Ecuaciones 6 y 7)

Sustituyendo, $r_2 = 2 \cdot r_1$ se deduce que:

$$I_{r2} = \frac{W}{4\pi(2 \cdot r_1)^2} = \frac{W}{16\pi \cdot r_1^2} \Rightarrow I_{r1} = 4 \cdot I_{r2}$$

(Ecuación 8)

Por lo tanto, si se duplica la distancia entre dos puntos de medida con respecto a la fuente sonora, la intensidad se ve reducida a la cuarta parte, cumpliéndose la mencionada ley de cuadrados inversos.⁽¹¹⁾

2.4 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA INTENSIDAD SONORA

Según la definición de intensidad sonora dada con anterioridad, la ecuación para la intensidad en la dirección r vendría dada de la siguiente forma:

$$I_{r_{inst}} = \frac{dEr}{dt \cdot dA}$$

(Ecuación 9)

Donde, dEr es la energía que fluye a través del diferencial de área dA perpendicular a la dirección de propagación en el periodo de tiempo dt . La energía, como se ha mencionado anteriormente, puede fluir en ambos sentidos para una misma dirección, siendo la intensidad sonora neta la que resulte del balance de energías entrantes y salientes a través del área considerada.

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Considerando que la energía resultante es igual a la fuerza resultante F_r multiplicada por el desplazamiento dr ; y la fuerza resultante es igual a la presión total p_t por diferencial de área dA , entonces:

$$dE_r = F_r \cdot dr = p_t \cdot dA \cdot dt$$

(Ecuación 10)

La presión total es la suma de la presión atmosférica (p_a) y de la variación que se produce respecto de ella (Δp_a); el término de presión atmosférica representa la componente continua de la presión total, mientras que el incremento de la presión respecto de la atmosférica representa la alterna, que puede ser producida por una onda sonora. Sustituyendo la ecuación 7 en la 6 nos quedaría:

$$I_{r_{inst}} = \frac{dE_r}{dt \cdot dA} = \frac{p_t \cdot dA \cdot dr}{dt \cdot dA} = p_t \cdot \frac{dr}{dt} = p_a \cdot u_r + \Delta p_a \cdot u_r$$

(Ecuación 11)

Considerando que u_r representa la velocidad de las partículas del aire, y llamando simplemente p , al incremento de presión respecto de la presión atmosférica Δp_a , queda:

$$I_{r_{inst}} = p_a \cdot u_r + p \cdot u_r$$

(Ecuación 12)

La componente continua de la intensidad instantánea tiene un valor promedio cero, ya que no aporta flujo neto de energía. El otro término es igual al producto de la presión sonora instantánea y la correspondiente velocidad de las partículas en la dirección r . Es decir, en un campo sonoro donde existe un flujo neto de energía, el vector intensidad es igual al resultado de multiplicar la presión sonora por la velocidad instantánea de las partículas del medio, promediado en el tiempo, en una misma posición de medida y en una dirección r determinada. De tal forma que nos quedaría:

$$I_r = \overline{p(t) \cdot u_r(t)}$$

(Ecuación 13)

Para un campo sonoro sinusoidal en donde se da que:

$$p(t) = p_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_1)$$

$$u(t) = u_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_2)$$

(Ecuaciones 14 y 15)

Sustituyendo estas ecuaciones en la ecuación 13 y resolviendo la integral quedaría lo siguiente:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

$$\bar{I} = \frac{1}{2} p_0 \vec{u}_0 \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2) = p_{RMS} \vec{u}_{RMS} \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

$$\bar{I} = p_{RMS} \vec{u}_{RMS} \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2)$$

(Ecuaciones 14 y 15)

El factor $\frac{1}{2}$ representa el promedio de la presión y la velocidad instantánea de las partículas. El factor es eliminado de la ecuación al determinarse los valores eficaces (RMS) de las señales en el proceso de medición.

Analizando la expresión (15), se puede concluir que la intensidad sonora no solo depende de la presión y la velocidad de las partículas, sino que también depende del desfase de ambas señales. Para poder determinar la intensidad sonora es necesario un equipo de medida muy preciso en la determinación de la fase de dichas señales. ⁽¹¹⁾

2.5 CAMPOS ACTIVOS Y REACTIVOS

Un campo sonoro es una región del espacio donde se propaga el sonido. Se considera que un campo sonoro es libre cuando no existen reflexiones de sonido que puedan concurrir en un punto. Por el contrario, se considera que el campo sonoro es difuso o reverberante, cuando el sonido se refleja tantas veces como se emite en todas las direcciones con la misma probabilidad. La propagación del sonido implica un flujo neto de energía, luego es necesario que se den en menor o mayor grado las condiciones de campo libre. El campo sonoro define las condiciones en las que tiene lugar la variación de la presión sonora en el espacio. Se considera que un campo sonoro es activo, cuando existe flujo de energía neto a través de una superficie. Por el contrario, se dice que un campo sonoro es reactivo puro, cuando no existe flujo de energía neto a través de dicha superficie. En este último caso, la energía fluye en un sentido atravesando la superficie definida, regresando posteriormente en sentido contrario. O también podría darse el caso, que la intensidad fuera paralela a la superficie, en cuyo caso el flujo de energía también sería cero. La energía se comporta en el campo sonoro de forma similar a como lo hace un resorte. Siendo, por lo tanto, la intensidad sonora nula.

En un campo sonoro libre ideal predomina de forma pura la componente activa, mientras que en un campo sonoro muy reverberante, la componente que domina es la reactiva.

Cuando la presión y la velocidad de las partículas están en fase, se dice que el campo es activo; en este caso se presentan las condiciones de campo libre y el producto de p y u da un valor definido. Entonces existe un flujo neto de energía. Según la ecuación 16:

$$\phi_1 = \phi_2$$

Y por tanto:

$$\vec{I}_r = p_{RMS} \vec{u}_{RMS} \cdot \cos(0^0) = \frac{p_{RMS}^2}{\rho \cdot c}$$

(Ecuación 17)

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Por el contrario, si la presión sonora y la velocidad de las partículas están desfasadas 90° entre sí, el campo se denomina reactivo. El producto de p y u varía sinusoidalmente alrededor de cero por lo que su valor promedio es nulo; de la expresión anterior:

$$\overline{I_r} = p_{RMS} \cdot \overline{u_{RMS}} \cdot \cos(90^\circ) = 0$$

(Ecuación 18)

En general los campos sonoros tienen ambas componentes: la activa y la reactiva. Es decir, habrá una parte de energía que fluya en una o más direcciones a través del espacio; y otra parte de la energía sonora, que entre y salga en esa zona del espacio donde existe el campo sonoro.

Como la velocidad de las partículas es una magnitud vectorial, puede descomponerse en dos componentes, una componente activa en fase con la presión sonora y otra reactiva desfasada 90° con la misma. Sólo la componente activa de la velocidad de las partículas multiplicada por la presión sonora dará un resultado no nulo. Por ello:

$$\overline{I} = \overline{I_{ac}} + j\overline{I_{re}} = \overline{I_{ac}}$$

(Ecuación 19)

Casi siempre que se efectúan mediciones de intensidad, lo que interesa es su componente activa, ya que es esta la que nos informa a cerca del flujo neto de energía. ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾