

3. TEORÍA DE LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD SONORA

Cuando una partícula de aire se desplaza desde su posición media se produce un incremento temporal de la presión. El incremento de dicha presión produce un empuje que se transmite de la partícula más próxima a la siguiente partícula y, por el efecto del choque entre partículas, un empuje en sentido contrario sobre la primera partícula que la desplaza hacia su posición de reposo. El ciclo de incremento de presión al aproximarse las partículas y el enrarecimiento del aire cuando se separan, se propaga a través del medio como una onda sonora. Hay por lo tanto, dos parámetros importantes en este proceso: la presión sonora que aumenta y disminuyen con respecto a la presión atmosférica y la velocidad de las partículas del aire que oscilan en una zona del espacio concreta.

Para medir la intensidad sonora es necesario conocer la presión sonora instantánea y la correspondiente velocidad de las partículas. La presión se puede medir fácilmente. Sin embargo, medir directamente la velocidad de las partículas del aire resulta más complejo y requiere transductores especiales, que por suerte cada vez están más accesibles. Pero también se puede aplicar un método alternativo consistente en medir la presión sonora con dos micrófonos separados una distancia prefijada. Este método alternativo resulta muy fácil de aplicar si se utiliza un analizador con al menos dos canales.

Por lo tanto, se puede considerar que existen dos tecnologías claramente definidas para la medida de la intensidad sonora. La primera basada en la medida de la presión sonora y la velocidad de las partículas con una sonda del tipo p-u. La segunda basada en la medida del gradiente de presión sonora en dos puntos muy próximos mediante dos micrófonos con una sonda del tipo p-p. ⁽¹¹⁾

3.1 SONDAS DEL TIPO p-p

Este método está basado en la segunda ley de Newton que es la ecuación fundamental de la dinámica, donde la fuerza resultante ejercida sobre un cuerpo de masa m , le transmite una aceleración inversamente proporcional a la masa de dicho cuerpo, $a = F/m$. La relación de Euler (ecuación 18) está basada en la expresión anterior, pero aplicada a un fluido de densidad ρ . Según esta ecuación, es el gradiente de presión quien acelera al fluido en una determinada dirección r . Conociendo el gradiente de presión y la densidad del fluido, puede calcularse la aceleración. Integrando la aceleración, obtenemos la velocidad de las partículas del medio:

$$-\text{grad}p = -\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial r} = -\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

(Ecuación 20)

Como el gradiente de presión es proporcional a la aceleración de las partículas, la velocidad de éstas se puede obtener integrando el gradiente de presión en la dirección r respecto del tiempo (Ecuación 21)

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

$$u_r = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt$$

(Ecuación 21)

En la práctica, el gradiente de presión puede ser aproximado mediante la medida de la presión en dos puntos, p_A y p_B , separados por un espaciador fijo. Si se divide la diferencia de presiones $p_A - p_B$, por la distancia que separa ambos micrófonos Δr , se obtiene una buena aproximación de la velocidad media de las partículas en la dirección r . La expresión (Ecuación 22) representa un estimador fiable que relaciona los parámetros mencionados anteriormente. ⁽¹¹⁾

$$\vec{u}_r = -\frac{1}{\rho \cdot \Delta r} \int (p_B - p_A) \cdot dt$$

(Ecuación 22)

Desde el punto de vista práctico, la sonda de intensidad sonora está formada por dos micrófonos separados por un espaciador. Midiendo ambas presiones, se obtiene el gradiente de presión a lo largo de la línea imaginaria que une el centro de ambos micrófonos; así mismo, la estimación de la velocidad de las partículas del aire se realiza en la posición central de esta línea, es decir, en el punto equidistante entre los micrófonos, figura 3:

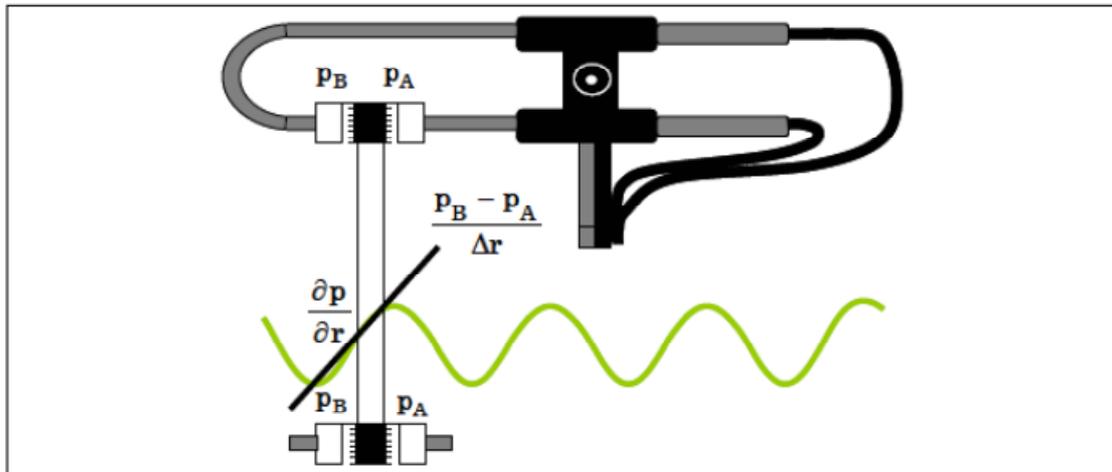


Figura 3. Determinación del gradiente de presiones con una sonda tipo p-p ⁽¹¹⁾

3.2 PROCESADO DE LA SEÑAL CON UNA SONDA DEL TIPO p-p

Un sistema analizador de intensidad sonora del tipo p-p consta de una sonda y un analizador. La sonda mide simultáneamente la presión sonora con dos micrófonos. El analizador realiza la integración y los cálculos necesarios para obtener la intensidad sonora. Estas ecuaciones no son nuevas. Lo que es nuevo es el uso de las modernas técnicas de procesamiento de señal para obtener la intensidad sonora. Ésta puede obtenerse de dos formas: mediante uso directo de integradores y filtros analógicos o digitales, para llevar a cabo la resolución de la ecuación, o mediante el uso de un

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

anizador FFT. Este último relaciona la intensidad con la parte imaginaria del espectro cruzado de las dos señales de los micrófonos. Las dos formas son equivalentes y con ambas se obtiene la intensidad sonora con aceptable fiabilidad.

3.2.1 MÉTODO DIRECTO

Los equipos que utilizan el método directo suelen ser portátiles, procesando la señal por medio de hardware específico que realiza los cálculos necesarios siguiendo la ecuación (22). La componente del vector de la intensidad sonora en la dirección r se calcula por medio de dicha expresión.

$$\overline{I_r} = \overline{p \cdot u_r} = -\frac{1}{2 \cdot \rho \cdot \Delta r} \overline{(p_A + p_B) \cdot \int (p_B - p_A) \cdot dt}$$

(Ecuación 23)

Donde la presión sonora es considerada como el valor medio entre las dos presiones medidas por los micrófonos. La velocidad de las partículas se calcula según la ecuación 22, vista con anterioridad.

En la figura 3 se muestra un diagrama de bloques de un medidor de intensidad sonora en tiempo real, incluido el filtrado digital en tercios de octava. Se puede observar que el diagrama de bloques sigue la ecuación paso a paso. En primer lugar la señal es captada por los micrófonos, preamplificada y filtrada. En segundo lugar se obtiene la presión media medida para ambos micrófonos por una parte y, por la otra, el gradiente de presión definido para ambas señales en el espacio. Finalmente, el producto de los valores obtenidos entre sí y su promediado posterior, determina el valor de la intensidad sonora. El método directo es muy útil para el desarrollo de equipos portátiles de medida. ⁽¹¹⁾

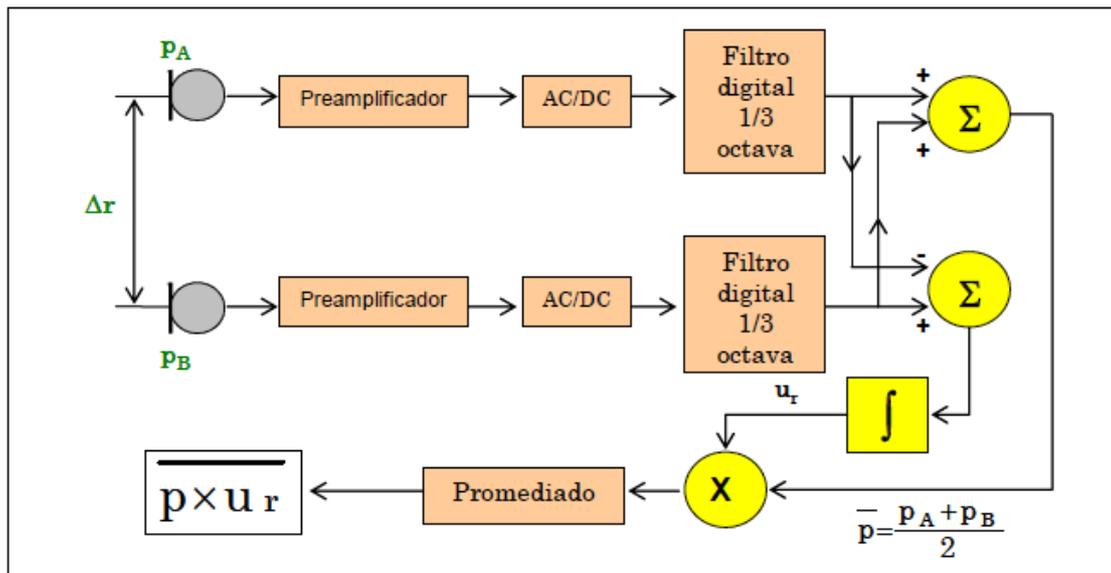


Figura 4. Esquema de bloque de un analizador que utiliza el método directo ⁽¹¹⁾

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

3.3. ERRORES EN MEDICIONES CON SONDAS p-p

Existen varias fuentes de error en la medición de la intensidad sonora. Algunos de ellos ligados al método en sí mismo y otros a deficiencias técnicas en las mediciones.

Las causas de error más importantes son: el error debido a la aproximación por diferencias finitas del gradiente de presión entre micrófonos y el error originado por la instrumentación debido al desajuste de la medida de la fase entre canales. Otra serie de errores son considerados de menor importancia por estar relacionados con aspectos aleatorios, ambientales o debidos a la falta de pericia en el manejo de la sonda.

3.3.1 ERROR POR APROXIMACIÓN DE FUENTES FINITAS

Las sondas de intensidad del tipo p-p, calculan la velocidad de las partículas determinando el gradiente de presiones entre los dos micrófonos, estando éstos separados una distancia conocida. La distancia de separación de los micros limita el rango de frecuencia de medida. Para una distancia determinada Δr , habrá un límite en alta frecuencias donde al disminuir la longitud de onda considerablemente se produzca un error significativo en la aproximación por diferencias finitas del gradiente de presión. ⁽⁷⁾

Para una separación efectiva de los micros, habrá un límite en alta frecuencia por encima del cual los errores se incrementarán significativamente. En la práctica se suelen considerar los siguientes límites superiores en frecuencia para las diferentes distancias estándar de separación de los micrófonos:

Longitud del espaciador [mm]	Límite superior de frecuencia [kHz]
50	1,25
12	5
6	10

Tabla 1. Límite de alta frecuencia según el espaciador. ⁽⁷⁾

En la siguiente figura puede observarse este error a altas frecuencias:

Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

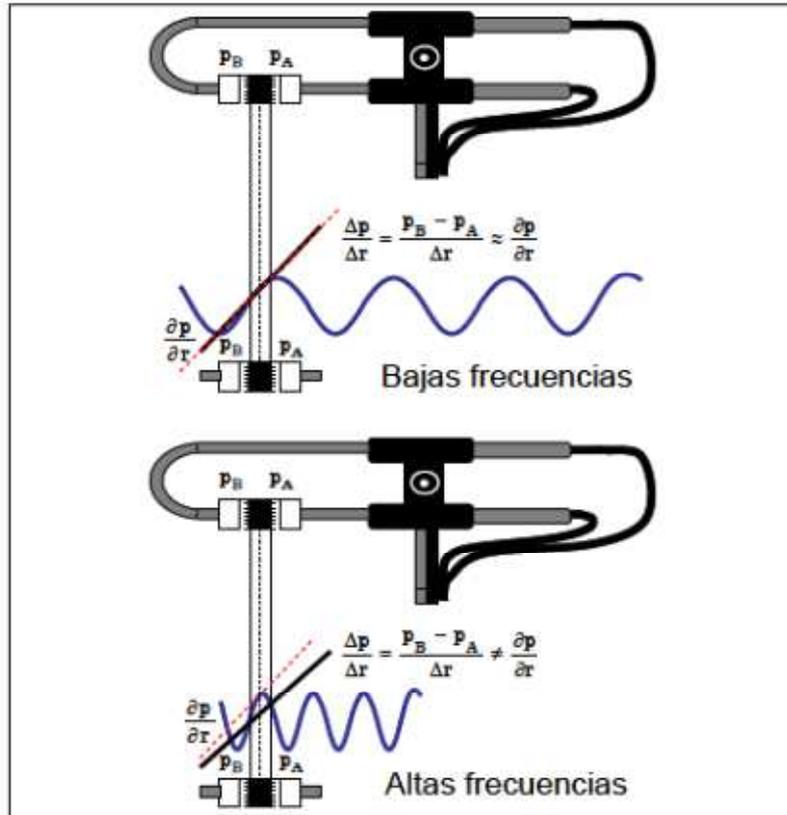
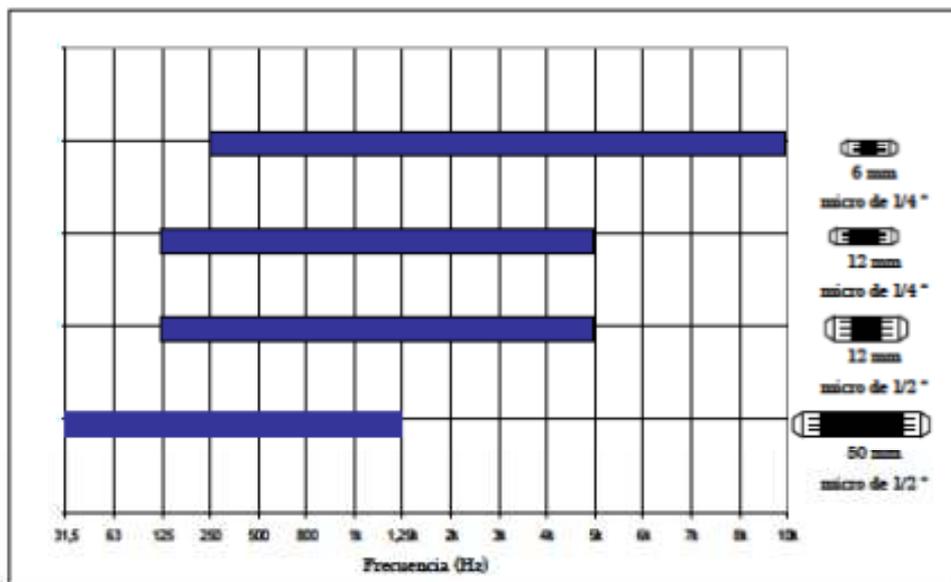


Figura 5. Medida del gradiente de presión a alta y baja frecuencia. ⁽¹¹⁾

A baja frecuencia la aproximación por diferencias finitas es correcta, y a alta frecuencia el error es considerable.

En la práctica los separadores se pueden fabricar en función del ancho de banda que interese y para una aplicación concreta. La siguiente figura muestra los separadores a utilizar según la frecuencia de trabajo:



Intensimetría acústica aplicada al aislamiento sonoro

Figura 6. Limitaciones en frecuencias para distintos separadores. ⁽⁷⁾

Las medidas a baja frecuencia deben realizarse con el separador de 50 mm, mientras que a alta frecuencia el ideal es el de 6 mm. ⁽⁵⁾

3.3.2 ERROR DEBIDO AL DESFASAJE ENTRE LOS CANALES

Las diferencias de fase entre las mediciones de ambos micrófonos son la fuente de error más importante en la medición de intensidad sonora, aun con los mejores equipamientos disponibles en la actualidad. Aunque los equipos actuales han evolucionado mucho y están en mejora continua, todos tienen algún desfase entre los canales que se suma al ángulo detectado por los micrófonos; a bajas frecuencias la diferencia de fase en el campo sonoro entre ambos micrófonos es extremadamente pequeña y la más mínima diferencia de fase introducida por el equipo puede generar grandes errores en la estimación de la Intensidad Sonora.

El equipo mide un ángulo que es la suma entre el desfase del campo sonoro, \emptyset , y el desfase introducido por la cadena de medición, φ .

$$\Phi = \emptyset + \varphi$$

(Ecuación 24)

Como se puede ver cuanto mayor es \emptyset , menor será el error relativo de la medición; por ello a bajas frecuencias donde \emptyset y φ pueden llegar a ser del mismo orden, el error introducido por el equipo puede llegar a ser considerable.

Por otra parte, estos límites no dependen exclusivamente del aparato sino que además son función del campo acústico bajo estudio.

Cuando el campo sonoro posee una componente reactiva considerable, el nivel de presión sonora es mayor que el nivel de intensidad sonora. La diferencia entre ambos niveles es el índice que mide la reactividad del campo, siempre y cuando se mantenga una correcta orientación de la sonda de intensidad. Esta circunstancia modifica la diferencia de fase que puede medirse en el campo sonoro. ^{(7) (11)}