

INTENSIMETRÍA SONORA: METODOLOGÍA Y APLICACIONES

Alan J. Urquiza Manzanelli^{1,2} y Valentín I. Lunati^{1,2}

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica, Facultad Regional Córdoba (FRC), Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina. CP X5016ZAA. Córdoba, Argentina.

²Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Asociada del CONICET, Facultad Regional Córdoba (FRC), Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina. CP X5016ZAA. Córdoba, Argentina.
52925@electronica.frc.utn.edu.ar, 50259@electronica.frc.utn.edu.ar

Resumen – *La intensidad sonora es el parámetro acústico que representa el flujo de energía sonora a través de una superficie determinada. La medición de este parámetro ha sido objeto de estudio durante muchos años, sin embargo solo en las últimas décadas pudo realizarse con precisión y exactitud adecuada debido a los significativos avances tecnológicos en el campo de la metrología acústica. El objetivo de este trabajo es analizar los parámetros acústicos implicados en la medición de la intensidad sonora los cuales fundamentan el desarrollo de nuevas técnicas de medición. Como principal aplicación se describe el método para determinar la potencia sonora de una fuente mediante la técnica de intensimetría.*

1. INTRODUCCIÓN

La *intensimetría sonora* es la técnica de medición y análisis de la *intensidad sonora* (*Sound Intensity: SI*), la cual es uno de los principales parámetros acústicos utilizados en la caracterización de fuentes campos y sonoros. Cuando se desea caracterizar el campo sonoro producido por una fuentes vibratoria, habitualmente se utiliza el *nivel de presión sonora* (*Sound Pressure Level: SPL*), siendo este parámetro acústico dependiente de la potencia de la fuente, la posición espacial y las condiciones físicas del medio. La intensidad sonora, por otro lado, depende de la potencia sonora de la fuente que atraviesa una superficie determinada [1], lo cual resulta una ventaja significativa sobre todo cuando esta última funciona en ambientes con diferentes condiciones acústicas.

En este trabajo se repasan los fundamentos de la técnica de intensimetría y muestran resultados de un caso experimental aplicado a la determinación de la potencia emitida por una fuente sonora. El trabajo está organizado de la siguiente manera: en primer lugar se repasan los principales parámetros acústicos que utiliza la técnica intensimétrica y sus relaciones; en segundo lugar, se describe el principio de funcionamiento de las sondas de medición de intensidad sonora y los errores asociados a la técnica. Por último, se describe el procedimiento de medición que recomienda la norma ISO 9614-1 para la determinación de la potencia sonora emitida por una fuente acústica mediante intensimetría y las conclusiones

2. MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD SONORA

2.1. Parámetros acústicos

La intensidad sonora es una magnitud vectorial que describe la cantidad y la dirección del flujo neto de energía en un punto de una superficie dada [2].

Este vector es perpendicular a la superficie de estudio. Si no existe flujo neto de energía en un punto entonces la intensidad sonora en ese punto será nula. De este modo la intensidad sonora en la dirección r es:

$$I_r = \frac{dE_r}{dt \cdot dA} \quad (1)$$

En donde E_r es la energía que fluye a través del diferencial de área dA perpendicular a la dirección de propagación r , durante el período de tiempo dt . La unidad de medida de la intensidad sonora es W/m^2 .

Con esta definición se puede expresar la potencia sonora de una fuente como el flujo de energía que atraviesa una superficie cerrada en función de la intensidad sonora como:

$$W = \int_A \vec{I} dA \quad (2)$$

La relación entre presión, intensidad y potencia sonora en la condición de campo libre es la siguiente:

$$I_r = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r_i^2} = \frac{p_i^2}{\rho c} \quad (3)$$

En donde p_i es la presión sonora instantánea, ρ y c la densidad y velocidad de propagación del medio respectivamente y r_i la distancia a la fuente sonora.

En la Figura 1 se observa que, la intensidad y la presión sonora disminuyen acorde aumenta la distancia existente entre el punto de medición y la posición de la fuente sonora según la ley de cuadrados inversos. 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.

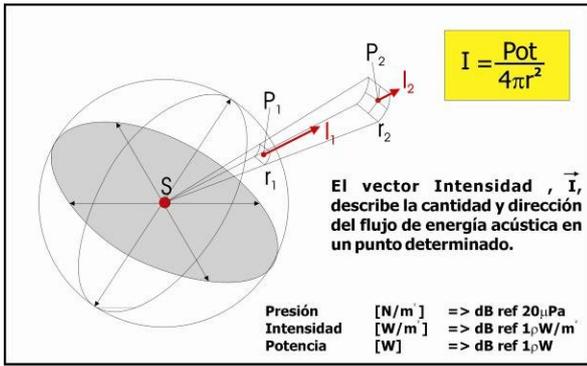


Figura 1: Representación gráfica del vector de intensidad sonora para una fuente puntual en campo libre.

Los niveles de presión, intensidad y potencia sonora se expresan en decibeles ó decibelios. El decibel, introducido por A. G. Bell, se define como diez veces el logaritmo decimal del cociente de dos magnitudes de la misma naturaleza (originalmente potencia eléctrica). Para el caso del *nivel de presión sonora*, el denominador de dicho cociente toma el valor de $p_o = 20 \mu P$, el cual representa la mínima variación de presión sonora respecto de la presión atmosférica que el oído humano puede identificar. Por lo tanto:

$$P[dB] = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{medida}[P]}{20\mu P} \right)^2 \quad (4)$$

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. El valor de referencia es aproximado para determinadas condiciones ambientales, ya que al redondear los valores se produce una pequeña desviación. Esta desviación depende de la impedancia característica del medio ρc . Para una impedancia de 407 Rayl ó N·s/m² (para el aire) se cumple que, para condiciones de campo libre, $L_p = L_I$ para un valor de referencia en el nivel de intensidad sonora de $I_o = 1 \text{ pW/m}^2$. Luego se toma como valor de referencia para el nivel de potencia sonora $W_o = 1 \text{ pW}$. Cabe destacar que se pueden producir variaciones significativas en la impedancia del medio cuando se realizan mediciones en zonas a elevada altitud, lo que puede afectar a la precisión de la medida; en el resto de los casos la variación de impedancia puede considerarse despreciable.

2.2. Fundamentos teóricos para la medición de la intensidad sonora

Recordando la Ec (1) y debido a que la energía puede fluir en un sentido u otro, la intensidad sonora

netará la que se corresponde con el balance entre la energía entrante y la saliente. Considerando que la energía resultante es igual a la fuerza resultante F_r , aplicada por el desplazamiento dr ; y la fuerza resultante es igual a la presión total p_t por diferencial de área dA , entonces:

$$dE_r = F_r \cdot dr = p_t \cdot dA \cdot dr \quad (5)$$

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. De estas ecuaciones se deduce que:

$$\begin{aligned} I_{r_{instantánea}} &= \frac{dE_r}{dt \cdot dA} = \frac{p_t \cdot dA \cdot dr}{dt \cdot dA} \\ &= (p_a + \Delta p_a) \cdot \frac{dr}{dt} = p_a \cdot u_r + \Delta p_a \cdot u_r \end{aligned} \quad (6)$$

La componente continua de la intensidad instantánea tiene un valor promedio cero, ya que no aporta flujo neto de energía. El otro término es el producto de la presión sonora instantánea por la velocidad de las partículas u_r en la dirección r .

Por lo tanto llamando p al incremento de presión respecto a la presión atmosférica, resulta que el vector intensidad sonora promedio es igual al producto entre la presión sonora y la velocidad de las partículas del medio, promediado en el tiempo:

$$\vec{I}_r = \overline{(p(t) \cdot \vec{u}_r(t))} \quad (7)$$

Para un campo sonoro sinusoidal en donde se da que:

$$p(t) = p_o \cos(\omega t + \phi_1) \quad (8)$$

$$\vec{u}_r(t) = \vec{u}_o \cos(\omega t + \phi_2) \quad (9)$$

Sustituyendo arriba es:

$$\begin{aligned} \vec{I}_r &= \overline{(p(t) \cdot \vec{u}_r(t))} \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T p_o \cdot \vec{u}_o \cdot \cos(\omega t + \phi_1) \cdot \cos(\omega t + \phi_2) dt \end{aligned} \quad (10)$$

Resolviendo la integral para un tiempo lo suficientemente extenso, nos queda:

$$\begin{aligned} \vec{I}_r &= \frac{1}{2} \cdot p_o \cdot \vec{u}_o \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2) \\ &= p_{RMS} \cdot \vec{u}_{RMS} \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2) \end{aligned} \quad (11)$$

A partir de esta ecuación se observa que la intensidad sonora no sólo depende de la presión sonora y la velocidad de las partículas sino también del desfase entre estas señales. Cuando p y u 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. De la expresión anterior se llega a:

$$|\vec{I}_r| = p_{RMS} \cdot |\vec{u}_{RMS}| \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (12)$$

Recordando que:

$$|\vec{u}| = \frac{p}{\rho \cdot c} \quad (13)$$

Para el caso en que ambas señales están en fase (o sea, $\phi_1 = \phi_2$), se obtiene:

$$|\vec{I}_r| = p_{RMS} \cdot |\vec{u}_{RMS}| \cdot \cos(0^\circ) = \frac{p_{RMS}^2}{\rho \cdot c} \quad (14)$$

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 se valor promedio es nulo; de la expresión anterior es:

$$|\vec{I}_r| = p_{RMS} \cdot |\vec{u}_{RMS}| \cdot \cos(90^\circ) = 0 \quad (15)$$

Generalmente los campos sonoros no son ni activos puros, ni reactivos puros, por lo tanto el desfase entre p y u puede variar entre -180° y 180° . 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:

$$\vec{I} = \vec{I}_{ac} + j\vec{I}_{re} = \vec{I}_{ac} \quad (16)$$

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.

Es interesante destacar el siguiente análisis que efectúa Fahy [3] (para la intensidad sonora activa y reactiva. Se puede expresar la presión sonora y la velocidad de las partículas como:

$$p(x, t) = P(x) \cdot e^{j(\omega t + \phi_P(x))} \quad (17)$$

$$u(x, t) = \left(\frac{j}{\omega \cdot \rho_o}\right) \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (18)$$

En la notación compleja de p y u se debe tener en cuenta que la presión sonora se escribe como una magnitud compleja en la que solo tiene sentido físico la parte real, en el caso de la velocidad de las partículas la notación compleja representa las dos componentes de la misma, una en fase (la parte real)

y otra en cuadratura (la parte imaginaria) con la presión sonora.

Por lo tanto, el gradiente de presión puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \left[\frac{dP}{dx} + j\left(\frac{d\phi_P}{dx}\right)P\right] \cdot e^{j(\omega t + \phi_P(x))} \quad (19)$$

Entonces u es:

$$u(x, t) = \left(\frac{1}{\omega \cdot \rho_o}\right) \left[-P\left(\frac{d\phi_P}{dx}\right) + j\frac{dP}{dx}\right] e^{j(\omega t + \phi_P(x))} \quad (20)$$

Así luego:

$$I = p \cdot u = I_{ac}(x, y) + jI_{re}(x, t) \quad (21)$$

En donde:

$$I_{ac} = -\frac{1}{\omega \cdot \rho_o} \cdot \left[P^2\left(\frac{d\phi_P}{dx}\right)\right] \cos^2(\omega t + \phi_P) \quad (22)$$

$$I_{re}(x, t) = -\frac{1}{4\omega \cdot \rho_o} \left[\frac{dP^2}{dx}\right] \sin(2(\omega t + \phi_P)) \quad (23)$$

Luego el valor promedio en el tiempo es:

$$\overline{I}_{ac}(x) = -\frac{1}{2\omega \cdot \rho_o} \left[P^2\left(\frac{d\phi_P}{dx}\right)\right] \quad (24)$$

$$\overline{I}_{re}(x) = 0 \quad (25)$$

De aquí se puede observar como el promedio temporal de la intensidad sonora activa es un valor finito, mientras que el valor medio de la intensidad sonora reactiva es nulo. Además se puede ver que la intensidad sonora activa depende del gradiente de fase de las componentes, la componente reactiva de la misma depende del gradiente de la presión cuadrática media. Este concepto será de vital importancia al momento de estudiar los errores y limitaciones de las técnicas de medición de la intensidad sonora. Como explica Jacobsen [1] la intensidad sonora reactiva describe la no propagación, el flujo oscilatorio de energía sonora que es característico del campo sonoro en el cual la presión sonora y la velocidad de las partículas están en cuadratura.

2.3. Sondas de intensimetría

Para medir la intensidad sonora es necesario conocer al mismo tiempo la presión sonora instantánea y la velocidad de las partículas. Para ello se pueden utilizar dos métodos distintos. Uno consiste en usar un transductor para medir la presión sonora y otro para la velocidad de las partículas, en este caso se trata de una sonda p-u. El otro método se basa en dos transductores de presión sonora separados una distancia conocida y a través de ellos hacer una estimación del gradiente de presión sonora y de la presión sonora en el centro de los

transductores, en este caso se trata de una sonda p-p. Actualmente son más utilizadas las sondas p-p, aunque con el avance que se está consiguiendo de los transductores de velocidad de las partículas en los últimos años las sondas p-u son cada vez más accesibles.

A continuación se analiza el principio de funcionamiento de las sondas de intensimetría tipo p-p. Este método se fundamenta en la relación de Euler, la cual dice que un determinado fluido de densidad ρ , el gradiente de presión es quien acelerará ese fluido en una dirección dada. Así conociendo la densidad del fluido y el gradiente de presión, se puede conocer la aceleración del mismo; luego integrando esta se obtiene la velocidad de las partículas del medio.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \therefore u_r = -\frac{1}{\rho} \cdot \int \frac{\partial p}{\partial r} \cdot dt \quad (26)$$

En la práctica se puede medir la presión sonora en dos puntos (p_B y p_A) separados una distancia Δr utilizando una sonda p-p como se muestra en Figuras 2 y 3. Si se divide la diferencia $p_B - p_A$ por la distancia Δr , se obtiene una muy buena aproximación del gradiente de presión siempre y cuando la separación entre los micrófonos sea mucho menor que la longitud de onda del sonido a medir, o sea, $\Delta r \ll \lambda$. Entonces:

$$\hat{u}_r = -\frac{1}{\rho \cdot \Delta r} \cdot \int (p_B - p_A) dt \quad (27)$$

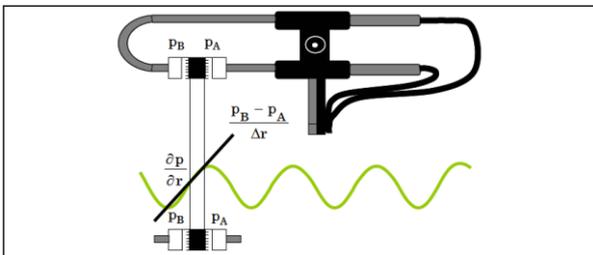


Figura 2: Determinación del gradiente de presión con una sonda p-p.

Es necesario recalcar que, dependiendo el orden en el que se tomen los micrófonos respecto de la dirección de propagación se pueden obtener valores positivos o negativos de intensidad sonora.

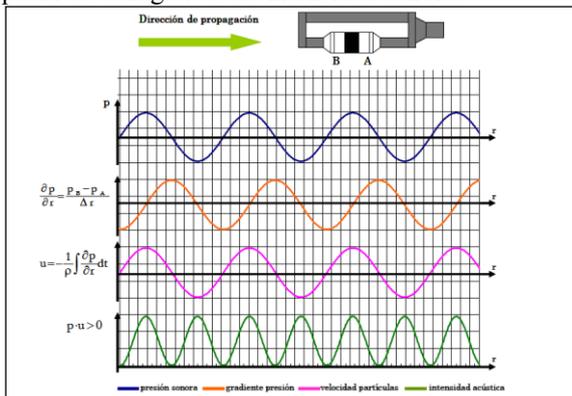


Figura 3: Determinación de la intensidad sonora mediante sonda p-p.

Otra característica importante de la sonda de medición es la direccionalidad de la misma. Las sondas son muy sensibles en la dirección r para la cual han sido diseñadas, sin embargo la medición es nula cuando la fuente sonora está situada perpendicularmente a la dirección de propagación r . Si la sonda de intensidad no se orienta en la dirección de la fuente, la intensidad medida por ésta es la resultante de proyectar el vector intensidad sobre la recta de dirección r como muestra la fig. 4. Entonces la intensidad sonora medida y la emitida por la fuente se relacionan a través de la siguiente ecuación:

$$|I_r| = |\vec{I}| \cdot \cos \theta \quad (28)$$

Finalmente, un sistema de medición de intensidad sonora de este tipo, estará formado por una sonda p-p y un analizador. Este analizador realiza los cálculos necesarios para obtener la intensidad sonora. Esta puede obtenerse por dos métodos, uno directo y otro indirecto. El método directo utiliza integradores y filtros analógicos o digitales para resolver la ecuación. El método indirecto, utiliza un analizador FFT de doble canal y relaciona la intensidad con la parte imaginaria del espectro cruzado (S_{AB}) de las dos señales de los micrófonos. Entonces, la intensidad puede ser calculada de la siguiente manera alternativa:

$$\vec{I}_r = -\frac{2I_m\{S_{AB}\}}{\omega \rho \Delta r} \quad (29)$$

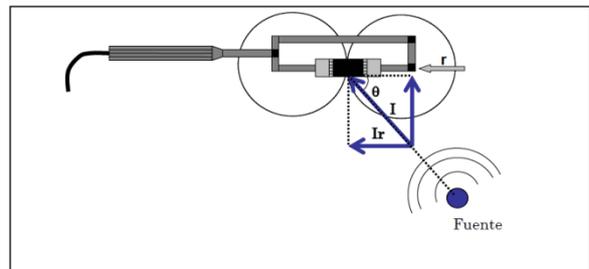


Figura 4: Direccionalidad de las sondas p-p.

3. APLICACIONES DE LA INTENSIMETRÍA

Las principales aplicaciones de la medición de intensidad sonora son descriptas a continuación:

3.1. Determinación de la potencia de una fuente sonora

La medición *in situ* de la potencia sonora de maquinarias industriales es una de las principales aplicaciones de la intensimetría. Recordando la ecuación (2), la potencia sonora de una fuente puede determinarse integrando la intensidad sonora sobre una superficie que encierre a la fuente. Este método es válido incluso ante la presencia de otras fuentes sonoras en el exterior de esa superficie, lo que hace innecesaria la medición en cámara anecoica o reverberante.

Para utilizar este método, es necesario que la fuente y el ruido de fondo sean estacionarios. Además, la fuente no debe operar en ciclos de trabajo largos, debido a que el campo sonoro variara durante la medición. Finalmente, el método no es utilizable para fuentes débiles de ruido de baja frecuencia debido al ruido eléctrico en los micrófonos.

La superficie de medición puede aproximarse mediante muestras en puntos discretos o escaneos continuos. De esta manera, la superficie es dividida en un numero conveniente de segmentos simples a una distancia de normalmente 25-50 cm de la fuente. Si el campo es muy reverberante o el ruido ambiente es significativo, la medición se hará más cerca de la fuente.

3.2. Identificación de fuentes de ruido y visualización de campos sonoros

Mediciones de la intensidad sonora sobre superficies bidimensionales permiten localizar fuentes de ruido visualizando el campo sonoro. Esta técnica junto con modernas herramientas de gráficos por computadora, permiten profundizar los análisis de radiación y propagación del sonido y los efectos de interferencias y difracciones.

3.3. Medición del índice de reducción sonora

La medición del índice de reducción sonora de paneles y particiones usualmente requiere de dos cámaras reverberantes con una gran aislación vibracional. Mediante intensimetría, esta medición puede realizarse utilizando solo una cámara reverberante. La principal ventaja de este método es que permite medir las pérdidas de transmisión sonora en particiones individuales de un material.

3.4. Medición del nivel de presión sonora de emisión

El nivel de presión sonora de emisión es el nivel de presión sonora en la posición de un operador cercana a una gran máquina. Realizar esta medición por intensimetría permite reducir el efecto de fuentes de ruido secundarias.

3.5. Medición de la absorción sonora

Es posible medir la absorción sonora de materiales *in situ* mediante intensimetría. Resultados recientes verifican esta posible aplicación, pero aun no se han desarrollado técnicas eficaces.

4. ERRORES EN MEDICIONES CON SONIDAS 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. Por un lado, el método es muy dependiente de las condiciones del campo sonoro

(viento, ruido ambiental, reverberación, etc.). Por otro lado, pequeños errores en las mediciones pueden ser amplificados debido a las integraciones necesarias en los cálculos. De esta manera, se presentan tres principales fuentes de error:

4.1. Error por la aproximación de diferencias finitas

Así como Fahy [3] demuestra matemáticamente que la aproximación por diferencias finitas genera un error sistemático que aumenta con la frecuencia de la onda sonora que se desea medir, Munuera [4] simplifica el panorama y concluye que el error por aproximación de diferencia finitas impondrá un límite en alta frecuencia para el cual el error de medición es aceptable. Por otro lado, debido a que los micrófonos se encuentran separados una distancia conocida y que el gradiente de presión se aproxima mediante una recta delimitada por la presión sonora en cada punto del espacio donde se ubican los micrófonos, cuando la longitud de onda de la señal disminuye (o sea que aumenta la frecuencia) ésta se vuelve comparable con la distancia que separa los micrófonos por lo que la aproximación deja de ser exacta, ver fig. 5.

Según Munuera [4] se puede obtener una precisión de ± 1 dB si se cumple que la longitud de onda de la señal a medir sea al menos 6 veces mayor que la longitud del espaciador. Existen varios separadores estándares cuyos límites en alta frecuencia son detallados en la tabla 1.

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

Tabla 1: Limite en alta frecuencia según el espaciador.

Para una onda sinusoidal plana en campo libre con propagación en dirección de la sonda de medición, se asume que la relación entre la intensidad sonora estimada y la real I_r , se expresa en la siguiente ecuación:

$$\frac{\hat{I}_r}{I_r} = \frac{\text{sen}(k \cdot \Delta r)}{k \cdot \Delta r} \quad (30)$$

De la misma manera, Jacobsen [1] plantea estas expresiones que limitarán el empleo de la técnica de medición en alta frecuencia.

Es importante que reconocer que estas fórmulas (ver Figura 5) no sirven para corregir los valores ya medidos sino que son meros indicadores del límite superior de frecuencia según el espaciador usado.

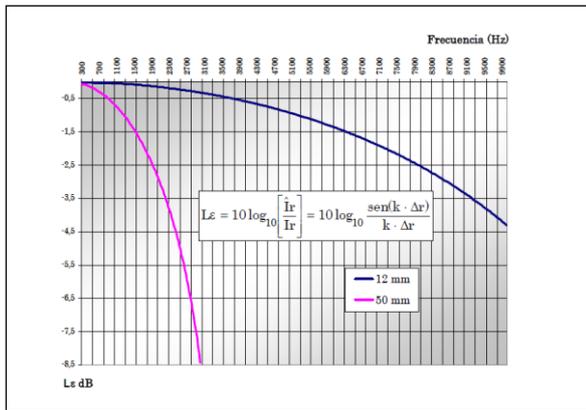


Figura 5: Error en la medición de intensidad sonora debido a la aproximación por diferencias finitas según el espaciador usado.

4.2. Error por scattering y difracción

La Ecuación (30) solo es válida para una sonda ideal que no perturba el campo en ninguna manera. Esta aproximación solo es válida cuando el tamaño de los micrófonos es pequeño comparado con la distancia entre ellos. Como demuestran diferentes investigadores [1] [4], el límite superior de frecuencia se puede extender al cancelarse el error producto de la aproximación por diferencia finitas con la propia interferencia que produce la sonda en el campo sonoro. Sin embargo, esto sólo ocurre si se usan micrófonos de ½ pulgada montados cara a cara con un separador de 12 mm. Bajo estas circunstancias el límite superior de frecuencia puede extenderse hasta los 10 kHz sin cometer un error apreciable.

Este fenómeno se debe a que la resonancia de las cavidades frontales de los micrófonos incrementa el nivel de presión sonora compensando el error cometido por la aproximación por diferencias finitas.

4.3. Error debido al desfase 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, \varnothing , y el desfase introducido por la cadena de medición, φ .

$$\Phi = \varnothing + \varphi \quad (31)$$

Como se puede ver cuanto mayor es \varnothing , menor será el error relativo de la medición; por ello a bajas frecuencias donde \varnothing 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.

5. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA SONORA DE UNA FUENTE

Como se comentó anteriormente, una de las aplicaciones de la intensimetría es la medición *in situ* de la potencia sonora generada por una fuente. Este procedimiento se puede realizar tanto con sondas p-p, como con sondas p-u. Sólo es necesario definir una superficie de integración a lo largo de la cual se medirán los diferentes valores de intensidad sonora mediante puntos discretos o mediante un barrido continuo a través de la misma.

El procedimiento de medición para determinar la potencia sonora con una sonda p-p usando el método de medición de puntos discretos está reglado por la norma ISO 9614-1:1993, la que especifica grados de precisión de acuerdo a la cadena de instrumentación empleada, así como también algunas recomendaciones a la hora de llevar a cabo la medición. De la misma manera, el procedimiento de medición por barrido continuo se regla por la norma ISO 9614-2:1993.

5.1. Calibración del sistema de medición

Una medición será tan precisa como lo sea el procedimiento por el cual se toman los datos; en el caso de la intensimetría es necesario tener en cuenta algunas cuestiones que resultan fundamentales a la hora de obtener resultados más o menos precisos. El sistema de medición estará compuesto al menos por una sonda de intensidad sonora, un analizador de espectro de doble canal y el equipo de calibración necesario. Antes de realizar cualquier medición es necesario que se calibre la cadena de medición, para ello se monta la sonda en un acoplador de tres cavidades, ver Figura 6; cuando los micrófonos están ubicados en las cavidades 1 y 2 se les envía a los dos la misma señal sonora, tanto en presión como en fase. De esta manera se puede calibrar los micrófonos de la sonda usando una referencia de nivel de presión sonora conocida, como por ejemplo un pistófono. Si se ubica un micrófono en la cavidad 1 otro en la cavidad 3, se simula el caso de utilizar la sonda con un espaciador determinado y así se puede verificar si la calibración ha sido correcta midiendo intensidad sonora o velocidad de las partículas.

Una vez que se ha calibrado el sistema se monta nuevamente un micrófono en la cavidad 1 y otro en la cavidad 2. Como se mencionó anteriormente, en este montaje ambos micrófonos reciben la misma señal sonora en fase y amplitud, por esto se puede determinar el desfase introducido por la cadena de medición, la cual será determinante a la hora de analizar la precisión de la medición sobre todo en las frecuencias más bajas. En este caso no se utiliza un

pistófono, sino un generador de ruido rosa a lo largo de todo el espectro de medición. Se procede luego a la medición del índice de presión-intensidad sonora residual, el cual es un indicador del desfase introducido por el sistema de medición. Este índice no es más que la diferencia entre el nivel de presión sonora y el nivel de intensidad sonora medidos.

$$\delta_{pI_o} = L_p - L_{I_o} \quad (32)$$

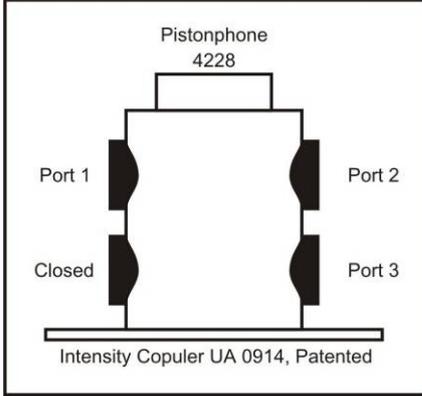


Figura 6: Acoplador para la calibración de sonda p-p.

Con la cadena de medición calibrada y verificada, y una vez medido este índice de presión-intensidad residual es posible comenzar la medición de intensidad para determinar la potencia sonora.

5.2. Determinación de potencia sonora mediante intensimetría, medición por puntos discretos

El procedimiento de medición por puntos discretos consiste en definir la superficie que encierra a la fuente mediante una cierta cantidad de puntos en los cuales se medirá la intensidad; cada punto representa una superficie determinada de la superficie total. De la norma ISO 9614-1:2003 se puede resumir el procedimiento de medición de la siguiente manera:

5.2.1. *Definir la superficie de medida alrededor de la fuente:* para ello tener en cuenta que la distancia promedio entre la superficie de medida y la superficie de la fuente bajo ensayo debe ser mayor que 50cm. En algunas ocasiones puede la superficie de medida incorporar áreas que no sean absorbentes (coeficiente de absorción menor que 0,06 como el piso o una pared rígida), en estos casos no se realizarán medidas de intensidad sobre estas superficies y sus áreas no se incluirán en la evaluación de la potencia acústica.

5.2.2. *Comprobar la estacionalidad del campo sonoro:* para esto se debe elegir una posición de medida típica sobre la superficie de medida y calcular el indicador F1 de la siguiente manera:

$$F_1 = \frac{1}{\bar{I}_n} \cdot \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (I_{nk} - \bar{I}_n)^2} \quad (33)$$

En donde, \bar{I}_n es el promedio de las M muestras I_{nk} que se toman en un tiempo de integración corto de entre 8

s y 12 s. M es generalmente 10. Como criterio se debe tener que $F1 < 0,6$; si esto no es así entonces se deben tomar acciones para disminuir la variabilidad temporal de la intensidad parásita, medir durante periodos de menor variabilidad o incrementar el tiempo de medida en cada posición.

5.2.3. *Comprobación de ruido parásito:* si se puede desconectar la fuente bajo ensayo, el ruido parásito será insignificante si los niveles de presión sonora (en dBA) de al menos 5 puntos de mediciones sobre la superficie de medida (distribuidos uniformemente) disminuyen al menos 10 dB cuando se desconecta la fuente.

5.2.4. *Mediciones de intensidad y presión sonora:* debe hacerse en aquellas bandas en que se desea calcular la potencia sonora, como mínimo en una posición por cada metro cuadrado y un mínimo de 10 posiciones distribuidas uniformemente. En los casos en que el ruido parásito es significativo y donde se puede requerir más de 50 posiciones de medición se puede reducir a una medición por cada 2 metros cuadrados siempre y cuando el mínimo sea de 50 mediciones. En caso de que el ruido parásito no sea significativo y para áreas de superficie de medida mayor a los 50 m², distribuir uniformemente 50 puntos de medición.

5.2.5. *Calcular los indicadores F2, F3 y F4:* se deben calcular los indicadores de campo para todas las bandas de frecuencia que se desea calcular la potencia sonora. Los mismos se calculan de la siguiente manera:

Indicador de presión-intensidad en la superficie:

$$F_2 = \bar{L}_p - \bar{L}_{|I_n|} \quad (34)$$

en donde:

$$\bar{L}_p = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right) dB \quad (35)$$

$$\bar{L}_{|I_n|} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right) dB \quad (36)$$

Indicador de potencia parcial negativa:

$$F_3 = \bar{L}_p - \bar{L}_{I_n} \quad (37)$$

en donde:

$$\bar{L}_p = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right) dB \quad (38)$$

$$L_{I_n} = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{ni} / I_o \right] dB \quad (39)$$

Para el caso en que la componente de intensidad acústica normal $L_{I_{ni}}$ en la posición i se exprese como XX dB, calcular la I_{ni} de la siguiente manera:

$$I_{ni} = I_o \cdot 10^{\frac{XX}{10}} \quad (40)$$

Si L_{lni} se expresa como (-) XX dB, entonces calcular I_{ni} así:

$$I_{ni} = -I_o \cdot 10^{\frac{XX}{10}} \quad (41)$$

Recordar que I_o es la intensidad sonora de referencia, y es 10pW/m^2 .

Si $\sum \frac{I_{ni}}{I_o}$ es negativo para alguna banda de frecuencia entonces las condiciones del ensayo no se satisfacen.

Indicador de no uniformidad de campo:

$$F_4 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_{ni} - \bar{I}_n)^2} \quad (42)$$

en donde:

$$I_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{ni} \quad (43)$$

5.2.6. *Comprobación de la adecuación del equipo de medida:* para que un conjunto de posiciones de medida sea calificado como apropiado para la determinación del nivel de potencia acústica, en cada banda de frecuencia de medida, el índice de capacidad dinámica L_d de la instrumentación de medida debe ser mayor que el indicador F_2 calculado según la Ec. 28.

$$\text{Criterio 1: } L_d > F_2 \quad (44)$$

El índice de capacidad dinámica viene dado por:

$$L_d = \delta_{pIo} - K \quad (45)$$

En donde el valor de K se selecciona de acuerdo al grado de precisión requerido según se muestra en la Tabla 2 [6].

Grado de precisión	Factor de error de desviación [dB]
Precisión (Grado 1)	10
Peritaje (Grado 2)	10
Control (Grado 3)	7

Tabla 2: Factor de error de desviación K según el grado de precisión requerido.

En caso de no cumplirse este criterio se puede optar por dejar asentado en el informe que la incertidumbre en esas bandas de frecuencia será mayor a la establecida, o bien tomar medidas que van desde acercar o alejar la sonda de medición, tomar más puntos de medición y otras de acuerdo sea el caso.

5.2.7. *Comprobación de la adecuación del conjunto de posiciones de medida elegido:* el número N de posiciones distribuidas uniformemente sobre la superficie es suficiente si se cumple que:

$$\text{Criterio 2: } N > C * (F_4)^2 \quad (46)$$

Donde F_4 se calcula según la ecuación (36) y el valor de la constante C viene dado por la Tabla 3.

Frecuencia central de las bandas de octava	Frecuencia central de las bandas de tercio de octava	C		
		Precisión	Peritaje	Control
63 a 125	50 a 160	19	11	
250 a 500	200 a 630	29	19	
1000 a 4000	800 a 5000	57	29	
	6300	19	14	
Ponderado A				8

Tabla 3: Valor de la constante C en función de las bandas de frecuencia a utilizar.

En caso de no satisfacer este criterio se puede aumentar uniformemente la cantidad de puntos de medida o incrementar la distancia promedio de la superficie con respecto a la fuente manteniendo la misma cantidad de puntos, según sea el caso.

5.2.8 *Cálculo de las potencias acústicas parciales para cada segmento de las superficies de medida:* para cada segmento de la superficie de medida en cada banda de frecuencia se tiene:

$$P_i = I_{ni} * S_i \quad (47)$$

En donde P_i es la potencia parcial para el segmento i , I_{ni} es el módulo de la intensidad normal medida en la posición i sobre la superficie de medida y S_i es el área del segmento i .

5.2.9 *Cálculo del nivel de potencia acústica de la fuente de ruido:* el nivel de la potencia sonora que está emitiendo la fuente viene dado por la suma de las potencias parciales de cada segmento en cada banda de frecuencia.

$$L_w = 10 * \log \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i}{P_o} \right) \right) \text{dB} \quad (48)$$

En donde P_i es la potencia parcial para el segmento i , calculado según la Ec. 47, P_o es la potencia de referencia ($=10\text{pW}$) y N es el número total de segmentos.

Si todos los indicadores de campo y los criterios de evaluación de precisión son correctos, la norma ISO 9614 asegura que la medición estará dentro de los márgenes de incertidumbre indicados en Tabla 4.

Cabe destacar además, que si para alguna banda de frecuencia es negativo, el método especificado en la ISO 9614 no es $\sum_{i=1}^N P_i$ aplicable a esa banda.

5.3 Recomendaciones de medición de intensidad sonora para la determinación de la potencia sonora de una fuente.

Frecuencia central de las bandas de octava	Frecuencia central de las bandas 1/3 de octava	Desviación Estándar		
		Precisión	Peritaje	Control
63 a 125	50 a 160	2	3	
250 a 500	200 a 630	1,5	2	
1000 a 4000	800 a 5000	1	1,5	
	6300	2	2,5	
Ponderado A				4

Tabla 4: Incertidumbres en la determinación de niveles de potencia sonora.

Siempre que se realice una medición de intensidad sonora es una buena práctica comprobar el nivel de presión sonora que mide cada micrófono usando un calibrador. También, se puede hacer una comprobación *in situ* de los valores de intensidad sonora que se miden. Para ello se debe colocar la sonda con su eje orientado en forma normal a la superficie en el punto en que se encuentre el mayor nivel de intensidad respecto a la intensidad promedio de la superficie y se toma el nivel de intensidad sonora en ese punto. Luego se rota la sonda 180°, ubicando el centro acústico de la misma en el mismo punto en que estaba en la medición anterior y se mide nuevamente la intensidad sonora. Para que el equipo sea aceptable para esa medición, debe cumplirse que para el máximo ancho de banda medible los dos valores de intensidad normal deben ser de signos opuestos y su diferencia debe ser menor a 1,5 dB.

En cuanto al lugar y las condiciones de medición se pueden señalar las siguientes indicaciones:

- No hacer mediciones si la velocidad del viento supera los 2 m/s; incluso debido a las fluctuaciones de las corrientes de aire puede haber una sobrestimación de la potencia sonora medida si la velocidad promedio del aire es de un valor próximo a los 2 m/s.

- Siempre usar la pantalla antiviento cuando se realicen mediciones en el exterior.

- Montar la sonda de modo tal que no esté sometida grandes vibraciones.

- No colocar la sonda a menos de 20 mm de cuerpos que tengan una gran diferencia de temperatura respecto a la temperatura del aire.

- La presión del aire y la temperatura afectan la densidad del aire y a la velocidad del sonido, por lo que es necesario tener en cuenta los efectos de estos fenómenos en la calibración de los instrumentos y se deben hacer las correcciones necesarias para indicar intensidades.

- Se debe buscar que la intensidad parásita sea la mínima posible. Además se debe asegurar que la variabilidad de la intensidad del ruido parásito no exceda el límite específico del indicador F1.

5.4 Ventajas e inconvenientes de la intensimetría para la medición de potencia sonora

Como se ha mencionado anteriormente la principal ventaja de la intensimetría para determinar

potencia sonora con respecto a otros métodos radica en poder hacer mediciones *in situ*, lo que suele ser muy necesario en caso de medir máquinas de gran porte que requerirían un gran trabajo de logística para el transporte y la instalación dentro de una cámara acondicionada acústicamente, lo que muchas veces suele ser imposible. En cuanto a la fase económica también es conveniente la intensimetría, ya que en el caso del operario de medición el costo de comprar y mantener la sonda de intensidad con todo su equipo de medición es mucho menor al de tener que montar una cámara anecoica o reverberante más el equipo de medición pertinente. En el caso de quien necesite utilizar la fuente que emite sonido, también conviene económicamente ya que la fuente nunca abandonaría su lugar de trabajo, por lo que disminuyen los costos de montajes y fletes así como también el tiempo que la máquina está fuera de servicio.

En cuanto a sus desventajas se puede hacer mención fundamentalmente de sus limitaciones en frecuencia. Recordando que en el mejor de los casos la sonda de intensidad puede medir hasta 10kHz en alta frecuencia. Y su límite inferior de frecuencia está dado no sólo por el equipo sino también por las condiciones del medio en el que se realice la medición.

Otra desventaja que presenta la técnica de puntos discretos radica en que todos los indicadores (salvo F1) se calculan luego del proceso de medición lo que no permite una corrección durante la medición; de esa manera si no se obtienen los resultados deseados hay que realizar nuevamente las mediciones con las correcciones pertinentes.

En algún momento se tomo como limitación la necesidad de que ambos micrófonos estén apareados y tengan prácticamente la misma respuesta en frecuencia, pero con el avance de la tecnología, hoy en día ese problema ha sido sorteado con éxito y es menos relevante. Además el advenimiento de los nuevos desarrollos en sondas p-p y p-u dan idea del gran futuro que tiene esta técnica.

6. CONCLUSIÓN

La medición de la intensidad sonora utilizando sondas *p-p* presenta las mayores ventajas desde un punto de vista técnico y económico, motivo por el cual es el más popular en la actualidad. A pesar de estas ventajas, este método adolece de los errores propios del cálculo aproximado de un gradiente por solo dos puntos discretos, lo que limita sus prestaciones y aplicabilidad.

En la actualidad, la intensimetría a cobrado gran popularidad sobretodo para la medición del nivel de ruido emitido por maquinarias industriales y en la generación de mapas de ruido para localización de las principales fuentes de ruido en una máquina o ambiente. Otra aplicación que esta tomando auge en la actualidad es la medición del coeficiente de absorción de materiales mediante intensimetría, debido a que simplifica notablemente los requerimientos para esta medición.

La medición de potencia mediante intensimetría es uno de los métodos más práctico y económico. Aunque es importante destacar que no alcanza el nivel de precisión que se logra con otros métodos, sobretodo en baja frecuencia. Esta falencia se esta superando en la actualidad con la construcción de sondas de medición de mejores prestaciones, sobretodo las p-u y el surgimiento de nuevas tecnologías como sondas de nivel de presión e intensidad ópticas [8].

7. REFERENCIAS

- [1] Finn Jacobsen, “*Sound intensity and its measurement and applications*”, Technical University of Denmark, Dinamarca, mayo 2011.
- [2] Gade, “*Sound Intensity: Theory. Instrumentation & applications, Parts 1-2*”. 1982.
- [3] Fahy F.J, “*Sound Intensity*”. 2nd Edition. E&FN Spon, London, 1995.
- [4] Manuera Saura G., “*Técnicas avanzadas de medida en intensimetría acústica para la caracterización de materiales aislantes*”, Universidad Politécnica de Cartagena, 2008.
- [5] Montoya A., Rolon S., “*Determinación de Niveles de Potencia Sonora con altos niveles de interferencia utilizando Intensimetría Acústica.*”, Universidad Tecnológica de Chile, 2006
- [6] UNE-EN ISO 9614-1. “*Determinación de los niveles de potencia acústica emitidos por las Fuentes de ruido por intensidad del sonido*”. España, 1995.
- [7] Brüel & Kjær. “*Sound Intensity Calibrator — Type 3541*”. Product Data.
- [8] Cazzolato, B. S., Halim, D., Petersen, C., Kahana, Y. and Kots, A., “*An optical 3D sound intensity and energy density probe,*” *Proceedings of Acoustics 2005, Busselton, Western Australia, Australia (2005)*, pp.101–106.

8. DATOS BIOGRÁFICOS

Alan J. Urquiza Manzanelli, nacido en Villa Dolores el 02/06/1989. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Desde el año 2010 es becario de investigación y desarrollo en el Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA) UA del CONICET, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. E-mail: 52925@electrónica.frc.utn.edu.ar

Valentín Ignacio Lunati, nacido en Córdoba el 17/02/1987. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Becario I+D en el CINTRA, miembro de la línea de Ecolocación Humana desde el año 2008. Fue además becario I+D en el grupo de investigación de Audición en Robótica en el equipo Robótica: Acción, Percepción del Laboratorio de Análisis y Arquitectura de Sistemas, LAAS de Toulouse, Francia, durante el año 2010 y 2011. E-mail: 50259@electrónica.frc.utn.edu.ar