



Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro

DESARROLLO DEL MÉTODO DE MEDICIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA SONDA DE INTENSIDAD ACÚSTICA MICROFLOWN TIPO "P-U"

Que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA

presenta:

OSVALDO LLAMAS LLAMAS

Dirigida por:

Director: M.C. Omar Alejandro Cervantes Gloria

Codirectora: M.A. Teresa de Jesús Gómez Lemus

Asesor: Dr. Raúl Ramírez López

Abril, 2023



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Querétaro
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Santiago de Querétaro., Qro. **18/abril/2023**
OFICIO No. DEPI/049/2023

LLAMAS LLAMAS OSVALDO
ESTUDIANTE DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA
PRESENTE

De acuerdo con el Reglamento para Exámenes Profesionales de la Dirección General de Educación Superior Tecnológica, se le autoriza la impresión de la Tesis, para obtener el Grado de MAESTRÍA EN INGENIERÍA, titulada:

"DESARROLLO DEL MÉTODO DE MEDICIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA SONDA DE INTENSIDAD ACÚSTICA MICROFLOWN TIPO "P-U"™"

Para el correspondiente Examen de Grado.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"la tierra será como sean los hombres"



P. a. Ramiro Rico
GABRIELA PINEDA CHACÓN
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

c.c. Coordinación de Posgrado
Archivo

Jany*



Av. Tecnológico s/n esq. Mariano escúbedo, Col. Centro, C.P.76000, Querétaro, Querétaro.
Plantel Centro tel. 01(442) 2274400 ext. 4421 y Plantel Norte tel. 01(442) 2435554
e-mail: depin@queretaro.tecnm.mx tecnm.mx | queretaro.tecnm.mx



2023
Francisco
VILLA



Santiago de Querétaro., Qro. **06/marzo/2023**

OFICIO No. DEPIN/037/2023

ASUNTO: CONSTANCIA DE NO PLAGIO

A QUIEN CORRESPONDA:

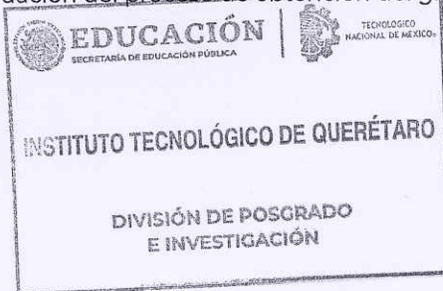
Por medio de la presente se hace constar que el trabajo de tesis con título: "**DESARROLLO DEL MÉTODO DE MEDICIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA SONDA DE INTENSIDAD ACÚSTICA MICROFLOWN TIPO "P-U"**"; ha sido revisado por medio de la herramienta de software TURNITIN, cuyo resultado se anexa a la presente y **no se ha encontrado evidencias de plagio en su realización**. El autor de dicho trabajo, estudiante de **Maestría en Ingeniería, LLAMAS LLAMAS OSVALDO**, es el responsable de la autenticidad y originalidad del mismo y manifiesta que para su desarrollo ha utilizado diversas citas para su soporte, mismas que han sido marcadas a lo largo del mismo y listadas al final como REFERENCIAS bibliográficas.

Se extiende la presente para la continuación del proceso de obtención del grado de Maestría en Ingeniería, y a petición del interesado.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
La tierra será, como sean los hombres*

GABRIELA PINEDA CHACÓN
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Coordinación de Posgrado

Jany*



Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo, Col. Centro, C.P.76000, Querétaro, Querétaro.
Plantel Centro tel. 01(442) 2274400 ext. 4421 y Plantel Norte tel. 01(442) 2435554
e-mail: depin@queretaro.tecnm.mx | tecnm.mx | queretaro.tecnm.mx



2023
Francisco
VILA

Santiago de Querétaro, Qro. 20 de abril de 2023.

El que suscribe, egresado de la Maestría en Ingeniería; de manera libre y voluntaria autorizo al Centro de Información del Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro a difundir la obra de mi autoría con el Título del trabajo **DESARROLLO DEL MÉTODO DE MEDICIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA SONDA DE INTENSIDAD ACÚSTICA MICROFLOWN TIPO "P-U"**. Para fines académicos, científicos y tecnológicos, mediante formato CD-ROM o digital, desde Internet, Intranet y en general cualquier formato conocido o por conocer.

Dicha obra estará disponible al estudiantado de esta Institución a partir del mes de mayo, fecha en la cual se puede difundir la obra.

Postulante: Osvaldo Llamas Llamas

No. de Control: M20141290

Correo electrónico: m20141290@itq.edu.mx

Título de la obra: **DESARROLLO DEL MÉTODO DE MEDICIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA SONDA DE INTENSIDAD ACÚSTICA MICROFLOWN TIPO "P-U"**.

Área del conocimiento: Acústica

Palabras clave de la obra: control de ruido, intensidad acústica, sonda "p-u", calibración, medición.



Osvaldo Llamas Llamas

Índice General

Índice de figuras	III
Índice de tablas.....	IV
Acrónimos.....	V
Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Abstract	XII
1. Introducción	1
1.1. Objetivo general	3
1.2. Objetivos específicos	3
1.3. Meta.....	4
1.4. Justificación	4
1.5. Impacto en la sostenibilidad	6
2. Marco teórico.....	9
2.1. Intensidad acústica	10
2.2. Campos sonoros.....	17
2.3. Medición de la intensidad acústica.....	22
2.4. El principio de medición “p-p”	23
2.5. Errores y limitaciones en la medición de intensidad acústica “p-p”	25
2.6. El principio de medición “p-u”	29
3. Estado del arte	34
3.1. Estimación de potencia acústica	34
3.2. Calibración de la sonda “p-u”	35
3.2.1. Calibración en campo lejano geométrico	36
3.2.2. Un monopolo en un bafle plano rígido	36
3.2.3. Un monopolo en un bafle esférico rígido.....	37
3.2.4. Métodos basados en un tubo de impedancia.....	38
4. Desarrollo del sistema de medición de intensidad acústica	39
4.1. Desarrollo del método de calibración de la sonda “p-u”	39
4.1.1. Introducción	39
4.1.2. Calibración para altas frecuencias	41
4.1.3. Calibración para bajas frecuencias	42
4.1.4. Combinación de los métodos de bajas y altas frecuencias	44

4.1.5. Modelo eléctrico de la sonda de intensidad “p-u”	44
4.1.6. Resultados	46
4.1.6.1. Infraestructura empleada en la calibración.....	46
4.1.6.2. Montaje y condiciones de prueba.....	47
4.1.6.3. Configuración para medias y altas frecuencias	48
4.1.6.4. Configuración para bajas frecuencias	49
4.1.6.5. Equipo de medición empleado	51
4.1.6.6. Obtención de la sensibilidad de los transductores de la sonda	54
4.1.6.7. Obtención de la fase de los transductores de la sonda	65
4.2. Desarrollo del método de medición de intensidad acústica con sonda “p-u”	67
4.2.1. Antecedentes.....	67
4.2.2. Introducción	68
4.2.3. Alcance.....	68
4.2.4. Incertidumbre de medición.....	68
4.2.5. Condiciones ambientales y entorno de medición	69
4.2.6. Equipos utilizados.....	70
4.2.7. Indicadores de campo	72
4.2.8. Medición	74
4.2.8.1. Preparación de la fuente y superficie de medición	74
4.2.8.2. Mediciones	75
4.2.9. Cálculos.....	77
4.2.9.1. Cálculo del nivel de potencia acústica de la fuente de ruido	78
4.3. Validación del sistema de medición de intensidad con sonda “p-u”	79
4.3.1. Información de la medición	79
4.3.2. Estimación de los niveles de potencia sonora por el método de intensidad	79
4.3.3. Estimación de los niveles de potencia sonora por el método de presión.....	81
4.3.4. Resultados	83
5. Conclusiones	88
Referencias	90

Índice de figuras

Figura 1. Fuerza y velocidad a través de un elemento de superficie en un fluido	14
Figura 2. Ilustración cualitativa de las zonas de campo de un radiador espacialmente extendido	19
Figura 3. Configuración de micrófonos	23
Figura 4. Error por la aproximación de diferencia finita	26
Figura 5. Diseño de la sonda Microflown PU	30
Figura 6. Sonda “p-u”	31
Figura 7. Patrón de directividad de niveles de presión sonora radiados por un monopolo.	37
Figura 8. Arreglo para calibración en altas frecuencias	41
Figura 9. Arreglo para calibración en bajas frecuencias	43
Figura 10. Modelo eléctrico de la sonda Microflown	44
Figura 11. Colocación del arreglo en el centro de la cámara anecoica	47
Figura 12. Arreglo para calibración en altas frecuencias en línea recta	48
Figura 13. Arreglo para calibración en altas frecuencias perpendicular	49
Figura 14. Arreglos para calibración en bajas frecuencias	50
Figura 15. Instrumentación empleada en la calibración	53
Figura 16. Sensibilidad del transductor de presión en diferentes posiciones	55
Figura 17. Curva de calibración del sensor de presión con diferentes materiales absorbentes en la fuente	56
Figura 18. Curva de calibración para el sensor de presión con ajuste	57
Figura 19. Curva de calibración para el sensor de presión	58
Figura 20. Curva de calibración sensor de presión obtenida y la reportada por el fabricante	58
Figura 21. Curva de calibración para el sensor de velocidad bajas frecuencias	60
Figura 22. Curva de calibración para el sensor de velocidad para altas frecuencias	61

Figura 23. Curvas de calibración para el sensor de velocidad para bajas y altas frecuencias	62
Figura 24. Unión de curvas de calibración para el sensor de velocidad bajas y altas frecuencias	63
Figura 25. Curva de calibración para el sensor de velocidad intervalo completo	63
Figura 26. Curva de calibración sensor de velocidad obtenida y la reportada por el fabricante	64
Figura 27. Modelo para la fase del sensor de presión, obtenida y la reportada por el fabricante.	66
Figura 28. Modelo para la fase del sensor de velocidad, obtenida y la reportada por el fabricante.	67
Figura 29. Sistema de medición de intensidad acústica.	70
Figura 30. Fuente sonora B&K 4205 y superficie de medición.	80
Figura 31. Fuente sonora B&K 4205 y ubicación de micrófonos	82
Figura 32. Nivel de presión acústica en la cámara semianecoica	83
Figura 33. Niveles de potencia sonora obtenidos en cada método de medición	87

Índice de tablas

Tabla 1. Dimensiones de la cámara anecoica	46
Tabla 2. Características del micrófono Brüel & Kjær 4133	52
Tabla 3. instrumentos empleados en la calibración de la sonda	52
Tabla 4. Configuración del módulo de adquisición Brüel & Kjær 3160-A-4/2	53
Tabla 5. Sensibilidad del sensor de presión, obtenida y reportada por el fabricante	59
Tabla 6. Sensibilidad del sensor de velocidad, obtenida y reportada por el fabricante	64
Tabla 7. Fase del sensor de presión, obtenida y la reportada por el fabricante	65
Tabla 8. Fase del sensor de velocidad, obtenida y la reportada por el fabricante	66
Tabla 9. Incertidumbre en la determinación de niveles de potencia acústica	69
Tabla 10. Instrumentos empleados en la medición de intensidad acústica	70

Tabla 11. Configuración módulo de adquisición	71
Tabla 12. Valores del factor C	74
Tabla 13. Dimensiones de la cámara semianecoica	79
Tabla 14. Equipo utilizado en el método de presión	81
Tabla 15. Coordenadas de ubicación de los micrófonos	81
Tabla 16. Dimensiones de la superficie de medición	82
Tabla 17. Niveles sonoros medidos en la cámara semianecoica	83
Tabla 18. Resultados método de presión	84
Tabla 19. Resultados obtenidos método de intensidad	85
Tabla 20. Niveles de potencia sonora obtenidos en cada método de medición	86

Acrónimos

a	Radio de la esfera de calibración, [m]
A_0	Área de la superficie del pistón en movimiento, [m]
b	Radio del altavoz, [m]
c	Velocidad del sonido en el aire, [m/s]
C_p	Frecuencias de corte de la fase, sensor de presión, [Hz]
C_u	Frecuencias de corte de la fase, sensor de velocidad, [Hz]
d	Distancia de separación de los centros acústicos de los micrófonos, [m]
e	Densidad de energía sonora, [Pa]
E	Energía sonora total en el volumen, [J]
f	Frecuencia, [Hz]
F	Fuerza, [N]
F_1	Indicador de variabilidad temporal del campo acústico
F_4	Indicador de no uniformidad del campo
F_5	Indicador de error de reactividad

f_{cp}	Frecuencias de corte de la sensibilidad, sensor de presión, [Hz]
f_{cu}	Frecuencias de corte de la sensibilidad, sensor de velocidad, [Hz]
h_m	Función esférica de Hankel de segundo tipo y orden m , [Hz]
h'_m	Derivada de la función esférica de Hankel
H_{pu}	Admitancia acústica específica sonda pu
$H_{p\hat{u}}$	Respuesta en frecuencia entre señales de la sonda pu
$H_{\hat{u}u}$	Función de transferencia compleja (autoespectro)
I	Intensidad del sonido, [W/m ²]
Im	Parte imaginaria de la intensidad
\bar{I}_n	Valor medio de I_n , [W/m ²]
I_{ni}	Intensidad medida en la posición i de la superficie de medición, [W/m ²]
I_r	Intensidad activa, intensidad real [W/m ²]
\hat{I}_r	Intensidad afectada por el desfase
J_r	Intensidad reactiva, [W/m ²]
k	Número de onda, igual a ω/ck
L_p	Nivel de presión acústica, [dB]
L_W	Nivel de potencia acústica, [dB re 1pW],
M	Número de muestras
\mathbf{n}	Vector unitario normal a la superficie
N	Número de segmentos
p	Presión acústica, [Pa]
P	Presión total del fluido, [Pa]
P_0	Presión media del fluido, [Pa]
p_0	Presión ambiental, [Pa]
P_m	Función de Legendre de orden m
p_{mref}	Tensión de salida micrófono de referencia, [V]
p_{ref}	Presión de referencia, 20 μ Pa
p_s	Tensión de salida sensor de presión, [V]

r	Distancia al centro de la esfera, [m]
Re	Parte real de la intensidad
s	Coordenada de la trayectoria de la partícula
S	Área, [m ²]
S_i	Área del segmento i , m ²
s	Desviación estándar
S_p	Sensibilidad del sensor de presión, [mV/Pa]
S_{ref}	Sensibilidad micrófono de referencia, [mV/Pa]
S_{pu}	Espectro cruzado entre la presión acústica y la velocidad de la partícula
S_u	Sensibilidad del sensor de velocidad, [mV/Pa*]
T	Energía cinética por unidad de volumen, [Pa]
t	Tiempo, [s]
\mathbf{u}	Vector velocidad de la partícula, [m/s]
U	Energía potencial por unidad de volumen, Pa
\mathbf{u}^*	Complejo conjugado de \mathbf{u}
u_s	Tensión de salida sensor de velocidad, [V]
V	Volumen, [m ³]
V_0	Volumen en equilibrio, [m ³]
V_0	Volumen interior de la esfera de calibración, [m ³]
W	Trabajo, [J]; Potencia acústica, [W]
W_i	Potencia acústica parcial del segmento i , [W]
W_0	Potencia acústica de referencia, 10 ⁻¹² [W]
Z_{esfera}	Impedancia de la fuente esférica, [Pa/Pa*]
γ	Relación de calores específicos
Δr	Distancia de separación del micrófono, [m]
$\delta\mathbf{S}$	Área vectorial elemental
λ	Longitud de onda, [m]

ρ	Densidad del aire, [kg/m ³]
ρ_0	Densidad media del aire, [kg/m ³]
ρc	Impedancia acústica del aire, [kg/m ² s]
φ	Error de desfaseamiento, [°]
$\varphi_{pu,cal}$	Corrección de fase entre p y u , [°]
ω	Frecuencia angular, [rad/s]

Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro y a los profesores de los que tuve la gran oportunidad de aprender.

A mis padres, José Luis y Piedad, por su ejemplo de trabajo, esfuerzo y dedicación. A mis hermanos, Juanjo y Sergio, por ser parte de este viaje académico, su presencia ha sido un fuerte respaldo.

Al Centro Nacional de Metrología por el apoyo otorgado para realización de mis estudios de maestría y en especial al Dr. J. Salvador Echeverría Villagómez, director general de Metrología Física, por su impulso para realizar estos estudios.

Al Dr. Andrés E. Pérez Matsumoto por su apoyo, orientación y enseñanzas durante el desarrollo de este proyecto.

Al M.C. Juan Ambrosio Martínez y al M.C. Hugo E. Gutierrez Hernández por su ayuda durante la parte práctica del proyecto.

*A América, Hazel y Pablo,
por su apoyo, comprensión y todo el tiempo que me dieron durante mis estudios de maestría.*

Resumen

La técnica de intensidad sonora es ampliamente utilizada en la determinación de la potencia acústica de fuentes sonoras, dadas las ventajas que ofrece para realizar mediciones in situ y evitar el uso de costosas instalaciones especiales. El método más común para realizar mediciones de intensidad acústica es el que se basa en la utilización de dos micrófonos de presión, también conocido como "p-p". Sin embargo, hace algunos años salió al mercado un nuevo tipo de sonda que utiliza un transductor llamado Microflown que permite medir directamente la velocidad de la partícula acústica en el aire, a este método se le conoce como "p-u". La sonda de intensidad que utiliza el método "p-p", cuenta con una serie de normas internacionales que describen tanto al instrumento como los diferentes métodos de medición, esto no sucede con la sonda de intensidad "p-u", este tipo de sondas no cuenta aún con métodos de medición estandarizados, debido a su aparición relativamente nueva en el mercado y a la carencia de sensores normalizados con los cuales se pueda comparar. En este trabajo se desarrolla un sistema de medición basado en la sonda de intensidad "p-u" para la determinación de potencia acústica, así como para aplicaciones de control de ruido y la identificación de sus fuentes. El sistema de medición incluye el desarrollo del método de calibración, el método de medición y la validación del sistema. Como resultado, CENAM cuenta con método de medición de intensidad sonora validado para este tipo de sonda; se da trazabilidad metrológica a patrones nacionales a los resultados de las mediciones realizadas con ella, a la vez que podrá ofrecer el servicio de calibración a los usuarios que cuente con estos equipos en el país. Como parte de los objetivos de este trabajo, se desarrollan además dos programas codificados en Octave que automatizan el procesamiento de los datos en ambos métodos.

Palabras clave: control de ruido, intensidad acústica, sonda "p-u", calibración, medición.

Abstract

The sound intensity technique is widely used in the determination of the acoustic power of sound sources, due to the advantages it offers for carrying out in situ measurements and avoiding the use of costly special installations. The most common method for sound intensity measurements is based on the use of two pressure microphones, also known as "p-p". However, a few years ago a new type of probe was introduced in the market that uses a transducer called Microflown that allows direct measurement of the velocity of the acoustic particle in the air, this method is known as "p-u". The intensity probe that uses the "p-p" method has a series of international standards that describe both the instrument and the different measurement methods. This is not the case with the "p-u" intensity probe; this type of probe does not yet have standardized measurement methods, due to its relatively new appearance on the market and the lack of standardized sensors with which it can be compared. In this work, a measurement system based on the "p-u" intensity probe is developed for the determination of acoustic power, as well as for noise control applications and the identification of its sources. The measurement system includes the development of the calibration method, the measurement method and the validation of the system. As a result, CENAM has a sound intensity measurement method validated for this type of probe; the results of the measurements made with it are metrologically traceable to national standards, and at the same time it will be able to offer the calibration service to users who have this equipment in the country. As part of the objectives of this work, two programs coded in Octave are also developed to automate the data processing in both methods.

Keywords: noise control, acoustic intensity, "p-u" probe, calibration, measurement.

1. Introducción

“El ruido suele definirse como cualquier sonido percibido que es desagradable o perjudicial para un humano” (F. Barron, 2003, pág. 2). “Desde el punto de vista de la acústica, el sonido y el ruido constituyen el mismo fenómeno de fluctuaciones de la presión atmosférica sobre la presión atmosférica media; la diferenciación es muy subjetiva” (Hansen, 1995, pág. 23).

“El ruido ha estado recibiendo un reconocimiento cada vez mayor como uno de nuestros problemas críticos de contaminación ambiental. Además de la pérdida de audición, los humanos se ven afectados de muchas otras maneras por los altos niveles de ruido” (Rossing, 2014). “El ruido puede interferir con la comunicación, causar alteraciones del sueño y efectos cardiovasculares, afectar a la salud mental, reducir el rendimiento, causar respuestas de molestia, y puede alterar el comportamiento social” (Schneider, 2005).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) más del 5% de la población mundial (466 millones de personas) padece pérdida de audición discapacitante. Se estima que a 2050 más de 900 millones de personas - una de cada diez - padecerá pérdida de audición. (OMS, 2019). La OMS señala también, que entre las causas adquiridas de la pérdida de audición está la exposición al ruido excesivo, por ejemplo, en entornos laborales en los que se trabaja con maquinaria ruidosa o se producen explosiones.

Cuando se evalúa el impacto del ruido en el bienestar humano se suele clasificar en dos tipos, como ruido ocupacional (ruido en el lugar de trabajo), o como ruido ambiental, que incluye el ruido en todos los demás entornos, ya sea a nivel comunitario, residencial o doméstico (por ejemplo, el tráfico) (Concha-Barrientos, Campbell-Lendrum, & Steenland, 2004).

En Europa, por ejemplo, el ruido ambiental, y en particular el ruido ocasionado por tráfico sigue siendo un problema ambiental importante que afectan a la salud y el bienestar de millones de personas. Se estima que al menos una de cada cinco personas está expuesta a niveles perjudiciales para la salud. La exposición a largo plazo causa 12 000 muertes prematuras y contribuye a que se produzcan 48 000 nuevos casos de cardiopatía isquémica por año. Además, se estima que 22 millones de personas sufren de altas molestias crónicas y 6.5 millones de personas sufren de alteraciones crónicas del sueño (EEA, 2020).

En el caso del ruido ocupacional, la exposición a ruidos dañinos es uno de los riesgos laborales más comunes a nivel mundial (L. Themann & A. Masterson, 2019). Le et al. (2017) citado por L. Themann & A. Masterson (2019) menciona que la exposición al ruido es la principal causa

de la pérdida de audición evitable. De acuerdo con Nelson et al. (2005) citado por L. Themann & A. Masterson (2019) se estima que la exposición al ruido en el trabajo es responsable del 16% de las pérdidas auditivas discapacitantes en adultos en todo el mundo. La exposición al ruido excesivo es la causa prevenible más común de la pérdida de audición (Le, Straatman, Lea, & Westerberg, 2017). La OMS, citada por Le (2017), estimó que un tercio de todos los casos de pérdida de audición puede atribuirse a la exposición al ruido.

En México, en una investigación retrospectiva de 1992 a 2002 se reportó que la hipoacusia por trauma acústico crónico representó 41% de las enfermedades de trabajo (Contreras Quevedo, 2013). Contreras menciona también que, de acuerdo con información de la Secretaría de Trabajo y Previsión Social del Gobierno Federal, la hipoacusia como enfermedad del trabajo ocupó el primer lugar a nivel nacional reportando 336 casos en el 2008, 1,363 en 2009 y 1,299 en 2010.

En cifras más recientes, de acuerdo con datos estadísticos del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), en el 2015 y 2016 la hipoacusia fue la principal enfermedad laboral en el país con 1,790 casos, 14.9% del total de las enfermedades reportadas en el 2015; y 1,873 casos, 14.8% en el 2016. En los años 2017, 2018 y 2019 ocupó el segundo lugar con 1,910 (13.5%), 2,230 (14.7%) y 1,712 (12.9%) respectivamente.

En cualquier sistema de control de ruido hay tres elementos básicos: la fuente del sonido, la trayectoria por la que viaja y el receptor (F. Barron, 2003). El control del ruido puede ser realizarse en cualquiera de estos elementos, reduciéndolo en la fuente, interfiriendo en su trayectoria y/o cambiando las características del receptor (W. Lang & C. Maling Jr., 2007). La mejor opción para realizarlo es en la fuente. De acuerdo con (A. Bies & H. Hansen, 2009) el control del ruido en la etapa de diseño se logra generalmente a una décima parte del costo de hacerlo posteriormente; como, por ejemplo, agregando una barrera.

La mejor magnitud para describir el ruido característico de una fuente es la potencia acústica, definida como la energía acústica irradiada/emitada por unidad de tiempo (Yunus, Alsoufi, & Hussain, 2015). La potencia acústica no se puede medir directamente, se determina por métodos indirectos. Uno de estos métodos es la técnica de intensidad acústica, la cual utiliza una sonda de intensidad para realizar las mediciones. Para determinar la intensidad acústica es necesario conocer la presión sonora instantánea y la correspondiente velocidad de las partículas. Una de las grandes ventajas de utilizar mediciones de intensidad, es que permite

determinar la potencia acústica de fuentes in situ, evitando el uso de costosas instalaciones especiales como las salas anecoicas y de reverberación.

Además de la determinación de potencia, la intensidad acústica es utilizada en otras aplicaciones como la identificación y clasificación de las fuentes de ruido, visualización de campos de sonoros, determinación de pérdidas de transmisión, y la determinación de la eficiencia de radiación de superficies vibratorias (Jacobsen F. , 2001).

El método más común para realizar mediciones de intensidad acústica es el que se basa en la utilización de dos micrófonos de presión espaciados a una determinada distancia, también conocido como "p-p". Hace algunos años salió al mercado un nuevo tipo de sonda que utiliza un transductor micromecánico llamado "Microflown" para medir directamente la velocidad de la partícula acústica en el aire, además de un micrófono de presión. Al método que utiliza esta sonda se le conoce como "p-u".

En la Dirección de Vibraciones y Acústica (DVA), del Centro Nacional de Metrología (CENAM), recientemente se adquirió una sonda de intensidad tipo "p-u", sin embargo, aún no se encuentra en funcionamiento, no se ha desarrollado un método de medición y tampoco se ha realizado su calibración, por lo que en la DVA se tiene la necesidad de poner en funcionamiento dicho equipo y así desarrollar servicios de medición basados en ésta.

1.1. Objetivo general

Desarrollar el sistema de medición de intensidad acústica basado en una sonda "p-u" en la Dirección de Vibraciones y Acústica (DVA) del Centro Nacional de Metrología, con base en las investigaciones existentes sobre el tema, a fin de contar con la capacidad técnica para ofrecer servicios a diferentes sectores usuarios relacionados con la determinación de potencia sonora, el control de ruido y la identificación de las fuentes que lo producen.

1.2. Objetivos específicos

- a) Desarrollar el método de calibración para la sonda de intensidad tipo "p-u" con el fin de garantizar la trazabilidad metrológica de los resultados de sus mediciones a patrones nacionales.

- b) Desarrollar el método de medición de intensidad acústica para la sonda de intensidad tipo “p-u”.
- c) Desarrollar un software para el procesamiento de datos y la presentación de resultados en la determinación de la potencia acústica.
- d) Validar el sistema de medición de intensidad acústica desarrollado.

1.3. Meta

Proporcionar las bases para el desarrollo de servicios que permitan a los clientes tener confiabilidad en sus medidas de control de ruido, identificación de fuentes de ruido y determinación de potencia acústica de sus productos.

1.4. Justificación

En el año 2005 la Academia Nacional de Ingeniería (NAE) de los Estados Unidos se dio a la tarea de organizar una serie de estudios para conocer el estado actual de la tecnología en materia de control de ruido en su país, los resultados se emitieron en el documento Technology for a Quieter America (2010). Entre los resultados del estudio, se indica que la competitividad de la industria manufacturera puede ser afectada debido a que las empresas deben competir tanto en el mercado interno como en el extranjero, en donde existen normas y reglamentos en materia de ruido. De igual manera, señala que la competitividad puede ser afectada de dos maneras: “1) pueden imponer costos adicionales a los fabricantes estadounidenses que quieran entrar en los mercados extranjeros” y 2) los productos de los competidores que cumplan los límites de ruido más rigurosos pueden tener una ventaja competitiva sobre los nacionales. “Esta ventaja se pone de manifiesto en una tendencia creciente de los consumidores que identifican el bajo nivel de ruido como una característica deseable”.

En muchos países de Europa y Asia, las personas que compran electrodomésticos disponen de información sobre los niveles de ruido” (W. Lang & C. Maling Jr., 2007). Las empresas en México que exportan y compiten, o deseen hacerlo en un futuro, en los mercados donde se encuentren regulaciones en materia de emisión de ruido, deben estar preparadas para diseñar productos que cumplan con los criterios de estos mercados. En Europa, por ejemplo, se han adoptado requisitos de emisión de ruido para muchos productos utilizados en el exterior (EU, 2005), por lo que los fabricantes nacionales que deseen exportar a estos países deberán de cumplir con estas regulaciones.

El Centro Nacional de Metrología es el laboratorio nacional de referencia en materia de mediciones, como parte de su misión, es responsable de ofrecer servicios metrológicos, como la calibración de instrumentos y servicios de medición, que inciden de manera positiva en la competitividad industrial, el medio ambiente y el bienestar de la población (CENAM, 2020).

En la Dirección de Vibraciones y Acústica, se han recibido diferentes solicitudes de servicio relacionadas con mediciones de potencia acústica, caracterización de fuentes sonoras y aislamiento acústico, entre otras. Desafortunadamente, muchas de ellas no se han podido atender debido a la falta de capacidades técnicas para llevarlos a cabo. Con la puesta en funcionamiento de la Sonda de Intensidad “p-u” se contará con la capacidad técnica para ofrecer estos servicios, así como ampliar y desarrollar nuevas capacidades de medición para cumplir con las necesidades de la industria. De esta manera, los fabricantes tendrán la posibilidad de realizar mejoras a sus productos en materia de emisiones sonoras, a fin de garantizar la salud y seguridad de los consumidores y usuarios, además de cumplir con las diferentes regulaciones en emisión de ruido que se exigen en los diferentes mercados.

Con la sonda en funcionamiento, además de realizar mediciones de intensidad para la determinación de la potencia acústica, se podrán desarrollar diferentes aplicaciones en materia de control de ruido como, por ejemplo, la identificación y clasificación de fuentes de ruido, visualización de campos de sonoras, determinación de pérdidas de transmisión, etc.

La sonda de intensidad que utiliza el método de "dos micrófonos" o "p-p", cuenta con varias normas internacionales que describen tanto al instrumento como a los diferentes métodos de medición, esto no sucede con la sonda de intensidad “p-u”, dado que su aparición en el mercado es relativamente nueva, no se cuenta aún con métodos de medición estandarizados, por lo que es necesario el desarrollo de un método de medición, como se está proponiendo en este proyecto, que permita realizar mediciones de intensidad de manera confiable y precisa.

Respecto a la calibración de la sonda se tiene el mismo caso que el punto anterior, no existen métodos normalizados que indiquen como se debería de realizar su calibración, la instrumentación a utilizar, las características del recinto donde se lleve a cabo, etc. Lo que se busca con la calibración es determinar la sensibilidad de ambos transductores en un campo sonoro, en el caso del micrófono de presión, la salida eléctrica para una determinada presión acústica y para el transductor de velocidad de la partícula, la salida eléctrica para una determinada velocidad de la partícula. En este proyecto se desarrolla un método de calibración

de acuerdo con recomendaciones internacionales y utilizando la instrumentación e infraestructura disponible en la Dirección de Vibraciones y Acústica. La calibración de la sonda garantiza la trazabilidad de los resultados de sus mediciones a patrones nacionales y asegurara la calidad de las mediciones realizadas.

De acuerdo con el sistema de calidad utilizado en los laboratorios de calibración, cuando un laboratorio desarrolla un sistema de medición, es necesario realizar su validación, esto es, asegurar que los requisitos especificados son adecuados para un uso provisto (ISO 17025), con esto se busca aportar evidencia objetiva de su funcionalidad y generar información acerca de la concordancia entre los valores medidos, así como el desempeño del equipo. Por tal razón, es necesario realizar un documento de validación del sistema de medición de intensidad, desarrollado para la sonda “p-u”.

1.5. Impacto en la sostenibilidad

Durante la Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible realizada en Nueva York del 25 al 27 de septiembre de 2015, los líderes mundiales aprobaron la Agenda para el Desarrollo Sostenible, la cual se plasmó en el documento llamado “Transformar Nuestro Mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” (ONU, 2015). En él se describen 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS). En el proyecto se identifica un impacto directo en los siguientes objetivos:

Objetivo 8 Trabajo Decente y Crecimiento Económico. “Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.”

8.8 “Proteger los derechos laborales y promover un entorno de trabajo seguro y protegido para todos los trabajadores”.

En un entorno ruidoso como el piso de una fábrica se pueden hacer mediciones del nivel de presión sonora para saber si los trabajadores se arriesgan a sufrir daños auditivos. Pero una vez que se han obtenido, es posible que sea necesario reducir el ruido. Para hacerlo, es importante saber cuánto ruido está siendo irradiado y por qué máquina. Por lo tanto, se necesita conocer la potencia sonora de las máquinas individuales y clasificarlas en el orden de mayor potencia sonora. Una vez que se haya localizado la máquina que hace más ruido, es posible que quiera reducir el ruido localizando el componente individual que lo irradia (Yunus, Alsoufi, & Hussain, 2015). Con los equipos tradicionales de medición de presión

sonora no es posible determinar o localizar la fuente exacta de ruido, esto se puede realizar con medidas de intensidad, utilizando una sonda de intensidad.

Objetivo 2 Salud y Bienestar. “Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades”

3.d “Reforzar la capacidad de todos los países, en particular los países en desarrollo, en materia de alerta temprana, reducción de riesgos y gestión de los riesgos para la salud nacional y mundial”

De igual manera, al realizar estudios de intensidad acústica en entornos laborales ruidosos se impacta a su vez al Objetivo 3, punto 3.d, ya que se trabaja en la reducción y gestión de riesgos para la salud. De hecho, el Gobierno de México menciona en su página web oficial (Gob, 2017), al hablar sobre la Agenda 2030, que este objetivo en particular se logrará con la participación de diferentes actores, entre ellos la iniciativa privada y la academia:

- Iniciativa privada: Asegura un ambiente de trabajo seguro y saludable para quienes laboran.
- Academia: Fortalece la investigación, colabora para crear soluciones innovadoras y apoya en la medición del impacto.

Objetivo 9 Industria, innovación e infraestructura. “Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación”

9.b “Apoyar el desarrollo de tecnologías nacionales, la investigación y la innovación en los países en desarrollo, en particular garantizando un entorno normativo propicio a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos, entre otras cosas”.

Como se ha mencionado en este documento, muchos de los equipos que generan niveles de ruido considerables, entre ellos los electrodomésticos, están sujetos a regulaciones en cuanto a emisiones acústicas. Para ello, los fabricantes necesitan determinar los niveles que emiten y realizar los diseños necesarios para lograr cumplir con estas regulaciones. Con la caracterización de la sonda se puede apoyar en servicios de medición a los diferentes fabricantes, de manera que estén en la posibilidad de desarrollar productos que cumplan con la normatividad, a la vez que ofrecen productos con un valor agregado, en este caso niveles bajos de emisión de ruido.

Por otro lado, de acuerdo con la Triple base del Desarrollo Sostenible, el proyecto tiene el siguiente impacto en cada una de sus dimensiones:

- Social: impacto en la salud de las personas expuestas a ruido y en su calidad de vida.
- Económica: apoya a la competitividad de las empresas con el desarrollo de sus productos y mejora en su calidad. Además, un impacto en los costos sanitarios que implica las afectaciones en la audición.
- Ambiental: ayuda en la reducción de la contaminación ambiental producida por ruido.

2. Marco teórico

En este apartado se presentan algunos conceptos básicos de acústica e intensidad, además, con el fin de mostrar el origen de la definición de la intensidad, se describen las relaciones entre presión y densidad de gases y entre trabajo y energía; se trata el tema de la energía sonora y su propagación; así como algunos aspectos sobre su conservación. Asimismo, se describen los diferentes campos sonoros y su relación con las mediciones de intensidad. Por último, se abordan los principios de medición junto con sus principales errores.

La acústica es la ciencia del sonido, se ocupa de su producción, su propagación desde la fuente hasta el receptor, su detección y percepción. La acústica abarca diferentes disciplinas académicas como la física, la ingeniería, la psicología, el habla, la audiología, la música, la arquitectura, la fisiología, neurociencias, entre otras. A su vez, cuenta con varias ramas, como la acústica arquitectónica, la acústica física, la acústica musical, la psicoacústica, la electroacústica, el control del ruido, la acústica fisiológica, etc. (Rossing, 2014).

El sonido es el resultado de las variaciones de presión, u oscilaciones, en un medio elástico (por ejemplo, aire, agua, sólidos), generadas por una superficie vibratoria, o un flujo de fluido turbulento (Hansen, 1995). Cuando una onda sonora se propaga en el aire, se generan variaciones de presión por encima y por debajo de la presión atmosférica que se transmiten al fluido circundante, esta presión acústica es expresada en Pascales [Pa] y es una cantidad escalar. Las variaciones de presión que es capaz de captar el oído humano son muy pequeñas, van desde 20 μPa (umbral auditivo), hasta 100 Pa (umbral del dolor).

En acústica es común utilizar una escala logarítmica para representar las diferentes magnitudes, a esta escala se le llama nivel y se define como el logaritmo base 10 de la relación entre una cantidad dada y una cantidad de referencia del mismo tipo. Aunque el nivel es una cantidad adimensional, se le da la unidad de bel, en honor a Alexander Graham Bell. En la práctica se utiliza el decibel [dB], la décima parte de un bel. EL nivel se suele designar con la letra L con un subíndice para indicar la magnitud descrita. Así, el nivel de presión acústica está definido como (ISO 80000-8:2021):

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_{ref}^2} \right) \quad (1)$$

Uno de los parámetros importantes que caracterizan el sonido es la frecuencia, la cual es definida como el número de ciclos de variación de presión en el medio por unidad de tiempo, su unidad de medida es el Hertz [Hz], el ruido suele estar compuesto por muchas frecuencias combinadas (Hansen, 1995). Un oído sano puede escuchar aproximadamente en un intervalo de 20 Hz hasta 20 kHz. Otro parámetro importante para determinar el comportamiento de las ondas de sonido es la longitud de onda λ , definida como la distancia recorrida por la onda de presión durante un ciclo, está relacionada con la frecuencia por medio de la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

2.1. Intensidad acústica

Los elementos fluidos en movimiento tienen energía cinética, y los cambios en la presión implican energía potencial. Por lo tanto, hay un flujo de energía involucrado en el fenómeno del sonido; las fuentes de sonido emiten energía sonora, y las ondas sonoras transportan energía (Jacobsen F. , 2014, pág. 1053). Un elemento importante en el control de ruido es determinar la potencia acústica y la contribución de los componentes de la fuente de ruido. Su relevancia radica en que es, en gran medida, independiente del entorno donde se encuentre la fuente. Las dos técnicas más utilizadas para la determinación de la potencia acústica son a partir de mediciones de presión acústica o de intensidad acústica.

La intensidad acústica es una medida del flujo de energía acústica en un campo sonoro, es un vector que describe el flujo neto de energía sonora por unidad de superficie promediado en el tiempo (Jacobsen F. , 2014), sus unidades son la potencia por unidad de área [W/m²].

La relación entre presión y densidad en gases

El sonido en un fluido implica esencialmente perturbaciones de la densidad del medio que varían en el tiempo con respecto a su valor de equilibrio, estos cambios de densidad son, generalmente, extremadamente pequeños en comparación con la densidad de equilibrio. Pueden ser atribuidos a los cambios en el volumen del espacio ocupado por una masa dada de fluido. (Fahy, 1995).

Las tensiones normales en un fluido, o presiones, tienen una importancia fundamental en el mecanismo de propagación del sonido. El coeficiente denominado módulo de masa relaciona

pequeños cambios de presión con pequeñas deformaciones volumétricas. El valor de este módulo en un gas depende del tipo de gas y de las condiciones del cambio volumétrico. El sonido en el gas es casi un fenómeno adiabático, en el que no se produce ningún intercambio de calor significativo entre las regiones más calientes y las más frías instantáneamente.

Se puede obtener una expresión para este módulo, considerando la presión del fluido P , la presión de equilibrio P_0 ; la densidad ρ y la densidad media ρ_0 ; y la relación entre los calores específicos de presión y volumen constantes γ . En las perturbaciones acústicas, se le llama presión acústica p a la diferencia entre la presión instantánea P y la presión media P_0 . En este caso para grandes desviaciones con respecto al equilibrio P y p varían con ρ en una relación no lineal, sin embargo, es asintóticamente lineal a medida que el cambio fraccionario de la presión p/P_0 tiende a cero (Fahy, 1995).

Cuando existen cambios pequeños, la relación entre la presión acústica y el cambio de densidad se da por

$$p = \delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \delta \rho \quad (3)$$

donde el subíndice 0 significa "evaluado en el equilibrio". De acuerdo con el enunciado de conservación de la masa de un elemento de volumen de equilibrio V_0 es

$$\rho V = \rho_0 V_0 \quad (4)$$

Por lo que la tensión volumétrica se puede expresar por

$$\frac{\delta V}{V} = - \frac{\delta \rho}{\rho} \quad (5)$$

Por consiguiente, la ecuación (3) para cambios adiabáticos donde P/ρ^γ es constante se puede escribir como

$$p = \frac{\gamma P_0 (\rho - \rho_0)}{\rho_0} = \gamma P_0 s \quad (6)$$

Trabajo y energía

El trabajo hecho sobre una partícula de materia que recibe una fuerza (F) y se mueve en el espacio está dado por (Fahy, 1995)

$$W = \int_A^B \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \quad (7)$$

En este documento se representarán los vectores en formato de negritas.

Donde A y B son los puntos inicial y final de la trayectoria.

En cualquier punto de la trayectoria se puede obtener la velocidad instantánea a la que la fuerza realiza el trabajo mediante la ecuación (7):

$$\frac{dW}{dt} = \mathbf{F} \cdot \left(\frac{d\mathbf{s}}{dt}\right) = \mathbf{F} \cdot \mathbf{u} \quad (8)$$

Si se sustituye la segunda ley de Newton del movimiento en la ecuación (7) se obtiene que el trabajo realizado sobre una partícula es igual al cambio de la energía cinética de la partícula, la energía cinética de una partícula por unidad de masa es $\frac{1}{2}\mathbf{u}^2$.

Por otro lado, para un fluido, la energía cinética por unidad de volumen es igual a

$$T = \frac{1}{2}\rho\mathbf{u}^2 \quad (9)$$

La energía potencial asociada con la tensión volumétrica de un volumen de fluido elemental es igual al trabajo negativo hecho por la presión interna del fluido que actúa sobre la superficie del volumen elemental durante la deformación. Considerando que el cambio de volumen total está dado por la integral sobre la superficie del desplazamiento normal de la superficie, está dada por

$$dU = -P \frac{dV}{V} \quad (10)$$

Donde P es la presión total, esto es, presión de equilibrio P_0 más presión acústica p . Sin embargo, P_0 se puede despreciar debido a que está asociada a una contribución muy pequeña y se equilibra con otro término, por lo que la ecuación (10) se reduce a

$$dU = -p \frac{dV}{V} \quad (11)$$

En la ecuación (5) se puede escribir dV/V como $d\rho/\rho$ y para la ecuación (6) $p/(\rho - \rho_0)$ como c^2 , por lo que $d\rho = dp/c^2$, asumiendo que $(\rho - \rho_0)/\rho_0 \ll 1$ la ecuación (11) se convierte en

$$dU = \frac{pdp}{\rho_0 c^2} \quad (12)$$

Por lo que la energía potencial por unidad de volumen es

$$U = \frac{p^2}{2\rho_0 c^2} = \frac{p^2}{2\gamma P_0} \quad (13)$$

La energía mecánica total por unidad de volumen, asociada a una perturbación acústica, conocida como "densidad de energía sonora", está dada por

$$e = T + U = \frac{1}{2}\rho_0 u^2 + \frac{p^2}{2\rho_0 c^2} \quad (14)$$

La cuál se aplica a cualquier campo sonoro en el que existe una pequeña perturbación y una condición de flujo medio nulo.

Propagación de la energía acústica, intensidad del sonido

La velocidad a la que se realiza trabajo sobre el fluido, en un lado de cualquier superficie imaginaria en el fluido, está dada por el producto escalar del vector fuerza que actúa sobre esa superficie por el vector velocidad normal de las partículas del fluido a través de la superficie (Fahy, 1995), esto es

$$\frac{dW}{dt} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{u} = p\delta\mathbf{S} \cdot \mathbf{u} \quad (15)$$

Donde $\delta\mathbf{S}$ es el área vectorial elemental, que puede ser escrita como $\delta S\mathbf{n}$, siendo \mathbf{n} es el vector unitario normal a la superficie dirigido al fluido que recibe el trabajo, ver figura 1.

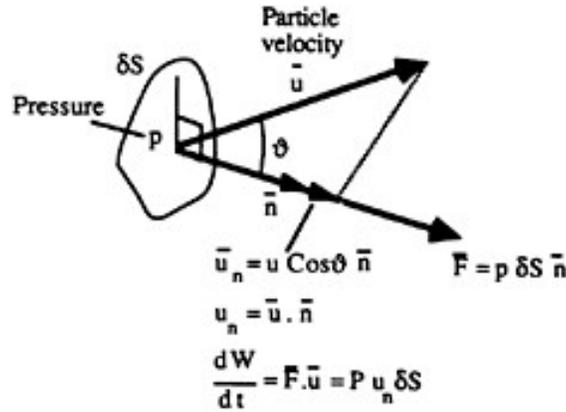


Figura 1. Fuerza y velocidad a través de un elemento de superficie en un fluido (Fahy, 2005).

Escribiendo la razón del trabajo por unidad de área como

$$\frac{\left(\frac{dW}{dt}\right)}{\delta S} = p u_n \quad (16)$$

A la cantidad vectorial pu se le conoce como intensidad sonora instantánea.

Conservación de la energía sonora

De acuerdo con la ecuación (16), la intensidad del sonido instantánea se define como el producto de la presión del sonido $p(t)$ y la velocidad de la partícula $\mathbf{u}(t)$ (Jacobsen F. , 2014):

$$\mathbf{I}(t) = p(t)\mathbf{u}(t) \quad (17)$$

La divergencia de la intensidad acústica instantánea se expresa por la ecuación (Jacobsen F. , 2011)

$$\nabla \cdot \mathbf{I}(t) = \nabla \cdot (p(t)\mathbf{u}(t)) = p(t)\nabla \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{u}(t) \cdot \nabla p(t) \quad (18)$$

Al combinarla con la ecuación linealizada de conservación de la masa se obtiene

$$\rho_0 \nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

Utilizando la relación adiabática entre los cambios en la presión sonora y en la densidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = c^2 \frac{\partial p}{\partial t} \quad (20)$$

para evaluar el primer término del lado derecho de la ecuación (18) se deriva una relación entre la divergencia de la velocidad de las partículas y la tasa de cambio de la presión sonora

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (21)$$

Para el segundo término se utiliza la ecuación de movimiento de Euler

$$\nabla p = -\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \quad (22)$$

Sustituyendo las ecuaciones (21) y (22) en (18)

$$\nabla \cdot \mathbf{I}(t) = -\frac{p(t)}{\rho c^2} \frac{\partial p(t)}{\partial t} - \rho \mathbf{u}(t) \cdot \frac{\partial \mathbf{u}(t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p^2(t)}{2\rho c^2} + \frac{\rho \mathbf{u}^2(t)}{2} \right) \quad (23)$$

Dado que el primer término dentro del paréntesis es la densidad de energía potencial instantánea y el segundo la densidad de energía cinética instantánea, la ecuación se puede simplificar como

$$\nabla \cdot \mathbf{I}(t) = -\frac{\partial w(t)}{\partial t} \quad (24)$$

donde $\nabla \cdot \mathbf{I}(t)$ es la divergencia de la intensidad del sonido instantáneo, esto es, la salida neta instantánea de energía sonora por unidad de volumen) y $w(t)$ es la densidad de energía instantánea total.

Esta ecuación representa la ecuación de conservación de la energía sonora, que expresa el hecho de que si hay un flujo neto de energía que se aleja de un punto en un campo sonoro, entonces la densidad de energía sonora en ese punto se reduce a una velocidad correspondiente (Jacobsen F. , 2014).

Utilizando el teorema de Gauss, el cual menciona que la salida neta de energía sonora integrada sobre un volumen dado es igual a la salida neta total de energía sonora a través de la superficie del volumen (Jacobsen F. , 2011)

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{I}(t) dV = \int_S \mathbf{I}(t) \cdot d\mathbf{S} \quad (25)$$

Combinado la ecuación anterior con la ecuación (24)

$$\int_S \mathbf{I}(t) \cdot d\mathbf{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V w(t) dV \right) = -\frac{\partial E(t)}{\partial t} \quad (26)$$

El término de la izquierda es la salida neta total de energía sonora a través de la superficie, y el término de la derecha es la razón de cambio de la energía sonora total en el volumen. Esto significa que el flujo neto de energía sonora que sale de una superficie cerrada es igual a la razón de cambio (negativa) de la energía sonora en el volumen encerrado por la superficie porque la energía se conserva.

Sin embargo, en la práctica, la intensidad media del tiempo es más importante que la intensidad instantánea, esto es

$$\mathbf{I} = \langle p(t)\mathbf{u}(t) \rangle_t \quad (27)$$

De la ecuación (24) se deduce que la integral del componente normal de la intensidad acústica promediada en el tiempo sobre una superficie cerrada es cero, cuando no hay generación ni disipación de energía sonora en el volumen encerrado en la superficie, independientemente de la presencia de fuentes estables fuera de la superficie.

$$\int_S \mathbf{I} d\mathbf{S} = 0 \quad (28)$$

Si la superficie encierra una fuente estable, entonces la integral de la superficie de la intensidad promediada en el tiempo es igual a la potencia sonora emitida por la fuente W es decir, independientemente de la presencia de otras fuentes estables fuera de la superficie.

$$\int_S \mathbf{I} d\mathbf{S} = W \quad (29)$$

Esta ecuación es la base para la determinación de la potencia del sonido utilizando la intensidad del sonido.

Ecuación de onda

“Las relaciones entre las variaciones de las magnitudes físicas en el tiempo y en el espacio son inherentes a la propagación de las perturbaciones por fenómenos ondulatorios. La

expresión matemática de estas relaciones se denomina ecuación de onda (Fahy, 1995, pág. 18)". Esta ecuación describe el movimiento ondulatorio en un fluido, para ello se combinan ecuaciones que expresan diferentes factores como la conservación de la masa, el equilibrio entre la fuerza longitudinal causada por una diferencia en la presión con la energía del medio y el hecho de que en el sonido no hay flujo de calor (Jacobsen F. , 2007). La forma de la ecuación dependerá de la naturaleza del movimiento y del medio donde se encuentre, además del sistema de coordenadas utilizado en su derivación. Expresada en términos de la presión acústica toma la forma siguiente:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \left(\frac{1}{c^2}\right) \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (30)$$

donde $c^2 = \gamma p_0 / \rho_0$

Esta ecuación rige el comportamiento del sonido en cualquier región del fluido en la que se cumplan los supuestos planteados en su derivación.

La diversidad de los campos sonoros implica que la ecuación tendrá que ser completada con las condiciones de contorno, esto es, el tipo de fuente, las superficies, la dispersión, entre otras.

2.2. Campos sonoros

Un campo sonoro es un espacio físico en el que se propagan las ondas sonoras, los campos sonoros difieren ampliamente en sus características temporales y espaciales, determinadas por la naturaleza, forma y localización de los mecanismos generadores de sonido, la forma y propiedades de los límites del medio fluido, y cualquier variación espacial de la velocidad del sonido dentro del medio (Fahy, 1995). Las características de un campo sonoro pueden describirse mediante diversos parámetros, como el nivel de presión sonora, el contenido en frecuencia y la distribución espacial.

Es común que en los distintos campos sonoros se presente el fenómeno de interferencia, esto es, la interacción entre ondas, esta interacción producirá una nueva onda que será la suma de todas las ondas diferentes. El proceso de interferencia que resulta de la superposición lineal de perturbaciones ondulatorias es la causa de muchos fenómenos acústicos comunes (Fahy,

2005). La superposición es aplicable a cualquier campo sonoro lineal, incluyendo el creado por el campo sonoro que irradia una fuente combinada con las reflexiones provocadas por los obstáculos del entorno.

La interferencia produce distribuciones muy complejas de los diferentes parámetros acústicos como la presión sonora, la velocidad de la partícula y por ende la intensidad, estas distribuciones son específicas de cada geometría y distribución de la intensidad de la fuente. Por lo que es conveniente hacer una división, a grandes rasgos, de un campo sonoro en diferentes zonas.

En cualquier punto cercano a una fuente, el campo acústico total se puede descomponer en tres componentes (Fahy, 1995):

- El campo radiado directamente por la fuente primaria;
- Los campos radiados directamente por otras fuentes presentes, que pueden ser partes del sistema mecánico de la fuente pero que se encuentran fuera de la superficie de medición;
- El campo producido por reflexión, dispersión y difracción de estos campos radiados directamente por cuerpos y superficies limítrofes.

A su vez, el campo directo de una fuente puede dividirse en tres regiones (Fahy, 2005), la figura 2 muestra estas zonas relacionadas con un cuerpo que vibra.

- Campo cercano hidrodinámico: es la región inmediatamente adyacente a la superficie vibrante de la fuente, generalmente a menos de 50–100 mm, en esta zona la presión sonora se encuentra estrechamente relacionada con la aceleración normal de la superficie local, la presión acústica está casi en cuadratura con la velocidad local de la partícula, y la magnitud de la velocidad partícula supera ampliamente $|p|/\rho_0 c$. La magnitud de la intensidad sonora es mucho menor que $|\overline{p^2}|/\rho_0 c$. Este campo será más intenso y extenso a medida que la fuente sea menos eficiente e irá disminuyendo con el aumento de la frecuencia, a medida que una fuente se hace más eficiente. Su espesor es mucho menor que una longitud de onda.

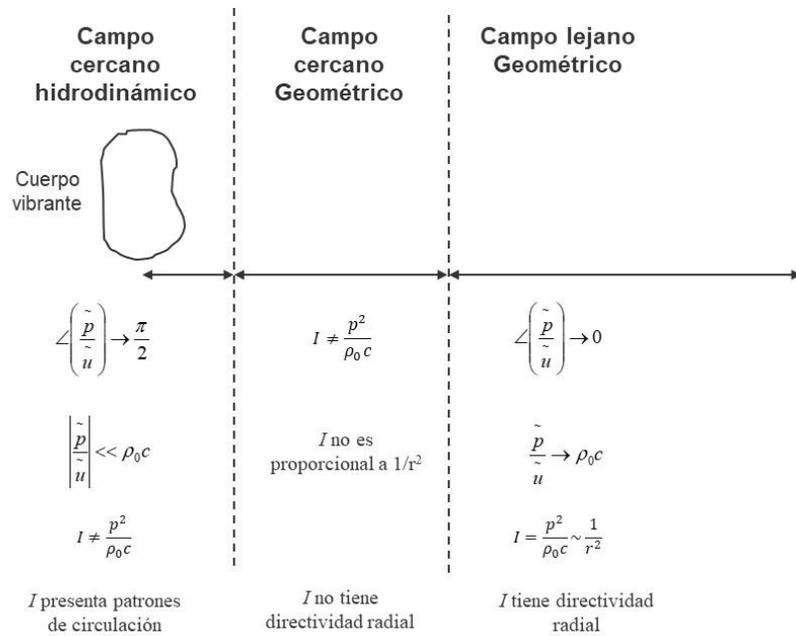


Figura 2. Ilustración cualitativa de las zonas de campo de un radiador espacialmente extendido (Fahy, 2005).

Por lo anterior, la eficiencia de realizar mediciones muy cerca de superficies vibrantes se reduce considerablemente. Dado que la propagación del sonido al campo lejano está asociada con los componentes en fase de la presión y la velocidad de las partículas, se deduce que las mediciones de la amplitud de la presión acústica en el campo cercano hidrodinámico no dan ninguna indicación de la potencia sonora radiada al campo lejano por la fuente (Harrison, 2004) .

- **Campo cercano geométrico:** es la región intermedia, aquí la dispersión esférica diferencial y las diferencias de fase controlan la interferencia. La presión cuadrática media no varía inversamente con la distancia al centro de la fuente; el vector de intensidad puede variar considerablemente en magnitud y fase dependiendo del punto de observación; y la intensidad radial no es necesariamente igual a $|\overline{p^2}|/\rho_0 c$. La extensión del campo cercano geométrico también es función de la frecuencia, pero dependerá de la distribución de fase de la fuente, así como también de la extensión espacial de la región de la fuente (correlacionada), ya que la dispersión diferencial sólo es significativa si esta región subtiende un ángulo grande en la posición del observador. En algunos casos el campo cercano geométrico puede no extenderse tanto como el campo cercano hidrodinámico.

En este campo, las velocidades de las partículas y los niveles de presión están en fase, por lo que, el sonido se propaga a través del campo cercano geométrico. Si se realiza un número suficiente de mediciones de presión sonora en este campo es posible determinar la potencia sonora radiada por una fuente.

- Campo lejano geométrico: en este campo la interferencia y la directividad está controlada principalmente por las diferencias de fase entre el sonido que llega desde diferentes regiones de la superficie. Los frentes de onda son casi esféricos, la presión y la velocidad de las partículas están casi en fase, la intensidad está dirigida radialmente y es igual a $|\overline{p^2}|/\rho_0 c$, y tanto la intensidad como la presión media cuadrática varían inversamente con el cuadrado de la distancia al centro de la fuente.

Campos sonoros activos y reactivos

Como se mencionó anteriormente, una de las características del campo sonoro cercano es que la presión sonora y la velocidad de las partículas están parcialmente desfasadas. Para describir este comportamiento se introducirán los conceptos de campo sonoro activo y reactivo.

La propagación del sonido genera un flujo de energía, sin embargo, puede haber presión sonora sin que exista propagación, cuando existe un flujo de energía se dice que es un campo activo, por el contrario, cuando no existe un flujo neto se dice que es en un campo reactivo puro, por lo tanto, la intensidad neta es cero. En este campo la energía se propaga hacia al exterior, pero en un momento dado regresará hacia el interior. En un campo sonoro real se suelen presentar componentes activos y reactivos (Brüel & Kjær, 1993).

La intensidad puede ser representada en su notación compleja, así, la intensidad activa es un vector definido como la parte real del producto de la presión compleja y el complejo conjugado de la velocidad de la partícula (Jacobsen F. , 2014)

$$I = \frac{1}{2} Re(pu^*) \quad (31)$$

donde u^* denota el complejo conjugado de u . De igual manera, la intensidad reactiva es el vector definido como la parte imaginaria del producto de la presión compleja y el complejo conjugado de la velocidad de la partícula

$$J = \frac{1}{2} \text{Im}(p\mathbf{u}^*) \quad (32)$$

De la ecuación (31) se deduce que la intensidad activa es proporcional al gradiente de la fase de la presión sonora

$$I = -\frac{|p|^2 \nabla \varphi}{2\rho c k} \quad (33)$$

Por su parte, la intensidad reactiva es proporcional al gradiente de la presión media cuadrática

$$J = -\frac{\nabla(|p|^2)}{4\rho c k} \quad (34)$$

En el campo cercano, el campo reactivo suele ser más fuerte que el campo activo a bajas frecuencias. Sin embargo, al aumentar la distancia a la fuente el campo reactivo se extingue rápidamente. Por lo tanto, el campo sonoro está dominado por el campo activo. La extensión del campo reactivo depende de la frecuencia y de las características de radiación de la fuente sonora. En la práctica, el campo reactivo puede considerarse despreciable a una distancia superior, por ejemplo, a la mitad de la longitud de onda de la fuente (Jacobsen F. , 2014).

Así, siendo I la parte real y J la parte imaginaria del producto de la presión y el complejo conjugado de la velocidad de la partícula, la intensidad sonora compleja se puede denotar como

$$I + iJ = \frac{1}{2} p\mathbf{u}^* \quad (35)$$

En un campo activo, la presión y la velocidad de partícula están en fase y el producto de ambas señales da como resultado una intensidad neta. Por el contrario, en un campo reactivo, la presión y la velocidad de partícula están desfasadas 90° , se encuentran desplazadas entre sí un cuarto de la longitud de onda, en este caso el producto de ambas señales da como resultado una señal de intensidad instantánea que varía alrededor de cero de forma sinusoidal, por ello la intensidad promediada en el tiempo es cero. Para el caso de un campo difuso, la fase de la presión y la velocidad de partícula varía aleatoriamente, de forma que, al igual que en un campo reactivo, la intensidad neta es cero (Brüel & Kjær, 1993).

2.3. Medición de la intensidad acústica

La medición de la intensidad acústica resulta más difícil que la medición de la presión acústica, estas dificultades radican principalmente en dos aspectos, la exactitud de las mediciones va a depender en gran parte del campo sonoro que se está estudiando, además, la distribución de la intensidad en el campo cercano de una fuente compleja es mucho más complicada que la distribución de la presión acústica (Jacobsen F. , 2001).

De acuerdo con la definición de la intensidad acústica instantánea, un sistema de medición de la intensidad debería, en principio, incorporar transductores de cada una de estas dos cantidades (Fahy, 1995). De manera general, existen tres principios posibles de medición (Jacobsen F. , 2014):

- la velocidad de las partículas se determina a partir de una aproximación por diferencia finita del gradiente de presión, esto es, la velocidad a la que la presión instantánea cambia con la distancia, utilizando dos micrófonos de presión muy próximos entre sí, este es el método tradicional y es conocido como el método “p-p” o de los dos micrófonos. Sin embargo, implementa un principio de transducción indirecta, combina dos micrófonos de presión y hace uso de una aproximación de diferencia finita al gradiente de presión (de Bree, 2009). De hecho, la norma internacional IEC 61043, que especifica los requisitos de funcionamiento de los instrumentos utilizados para la medición de la intensidad del sonido, se refiere solo a este principio de medición.
- utilizando la combinación de un micrófono de presión y un transductor de velocidad de la partícula, conocido como el método “p-u”.
- determinando la presión a partir de una aproximación por diferencia finita de la divergencia de la velocidad de las partículas, conocido como el método u-u, este método implica tres pares de transductores de velocidad de partículas emparejados, sin embargo, nunca se ha utilizado en el aire.

2.4. El principio de medición “p-p”

Este método ha dominado las mediciones de intensidad acústica en los últimos años, tal es así, que la norma de la International Electrotechnical Commission (IEC) sobre instrumentos para la medición de la intensidad del sonido y su correspondiente norma del American National Standards Institute (ANSI) tratan solo de este método.

Este principio consiste en ubicar dos transductores de presión nominalmente idénticos a una pequeña distancia entre ellos en una estructura de soporte. Los transductores son normalmente micrófonos de condensador de alta calidad, con estos se obtiene una señal proporcional a la componente de la velocidad de la partícula, que es colineal con el eje de la sonda empleando una aproximación de diferencia finita al gradiente local espacial de la presión acústica.

Para obtener la velocidad de la partícula hace uso de la ecuación de movimiento de Euler linealizada. Esta ecuación es básicamente la segunda ley de Newton aplicada a un fluido. En la ecuación de Euler el gradiente de presión acelera un fluido de densidad ρ , por lo que, si se conoce el gradiente de presión y la densidad del fluido, es posible calcular la aceleración de la partícula, posteriormente, integrando la señal de aceleración se obtiene su velocidad (Brüel & Kjær, 1993).

El método consiste en colocar dos micrófonos de presión en una posición cercana uno del otro, la configuración de los micrófonos puede ser variada: *face-to-face*, *side-by-side*, *tandem and back-to-back*, ver figura 3. La disposición *face-to-face* tiene la ventaja de que los diafragmas de los micrófonos pueden colocarse muy cerca de una superficie radiante, pero tiene la desventaja de que los micrófonos se obstruyen mutuamente. A altas frecuencias, la configuración cara a cara con un espaciador sólido entre los micrófonos se considera superior (Crocker & Arenas, 2003).

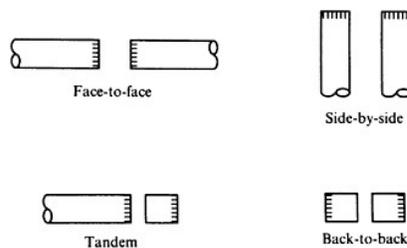


Figura 3. Configuración de micrófonos (Fahy, 2005).

Al emplear una aproximación por diferencias finitas al gradiente de presión acústica, se obtiene una señal proporcional a la componente de la velocidad de las partículas, colineal con el eje de la sonda, esto es, a la línea que une los centros acústicos de los micrófonos. En un campo sonoro de pequeña amplitud, la ecuación del momento del flujo promedio del fluido muestra que, la componente del gradiente de presión en cualquier dirección n es proporcional a la componente de la aceleración de las partículas de fluido en esa dirección (Fahy, 1995)

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial t} \quad (36)$$

Así, la componente correspondiente de la velocidad de la partícula se da por la integral siguiente

$$\mathbf{u}_n(t) = -\frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t \left(\frac{\partial p(\tau)}{\partial n} \right) d\tau \quad (37)$$

La cual se aproxima a

$$\mathbf{u}_n(t) \approx \left(\frac{1}{\rho_0 d} \right) \int_{-\infty}^t [p_1(\tau) - p_2(\tau)] d\tau \quad (38)$$

La presión en el punto medio entre los micrófonos se aproxima como

$$p(t) \approx \frac{1}{2} [p_1(t) - p_2(t)] \quad (39)$$

Por lo que, la componente de intensidad instantánea se aproxima por

$$I_n(t) \approx \left(\frac{1}{2\rho_0 d} \right) [p_1(t) - p_2(t)] \int_{-\infty}^t [p_1(\tau) - p_2(\tau)] d\tau \quad (40)$$

En el caso de dos señales estacionarias, $x(t)$ y $y(t)$ tal que

$$x \left(\frac{dx}{dt} \right) = y \left(\frac{dy}{dt} \right) = 0$$

$$x \left(\frac{dy}{dx} \right) = -y \left(\frac{dx}{dt} \right)$$

donde p_1 es la derivada en el tiempo de $\int p_1 d\tau$

Entonces, la intensidad activa promedio en la dirección n está dada por la ecuación siguiente

$$I_n = - \left(\frac{1}{\rho_0 \Delta r} \right) \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T \left[p_1(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] dt \quad (41)$$

Por lo anterior, para las sondas que utilizan el método “p-p” la distribución en frecuencia de la intensidad promedio se puede determinar por medio de la ecuación (40), para ello, se utilizan dos filtros idénticos por donde se pasarán las dos señales, para posteriormente obtener el promedio del producto de las salidas filtradas. Para las señales estacionarias es posible utilizar la ecuación (41). Los procedimientos anteriores son conocidos como análisis de frecuencia directa (Fahy, 1995).

2.5. Errores y limitaciones en la medición de intensidad acústica “p-p”

En las mediciones de intensidad acústica se pueden encontrar diversas fuentes de error, algunas pueden ser fundamentales y otras se pueden relacionar a deficiencias técnicas. Una de las limitaciones más importantes es que la exactitud de las mediciones que dependerá en gran medida del campo sonoro que se esté estudiando, en donde el equipo de medición utilizado tendrá una fuerte influencia (Jacobsen F. , 2011).

También, otro problema importante es el referente a la distribución de la intensidad sonora en el campo cercano de una fuente, ya que en este caso suele ser más complicada que la distribución de la presión sonora.

Para los sistemas de medición del tipo “p-p” se identifican las siguientes limitaciones:

- Error por la aproximación de diferencia finita
- Errores debido a la dispersión y la difracción
- Desajuste de fase de la instrumentación
- Señales de intensidad falsas adicionales causadas por la turbulencia a bajas frecuencias

- Errores de sesgo causados por las pérdidas de la pantalla de viento
- Errores aleatorios asociados a un tiempo de promedio finito
- Error aleatorio causado por el ruido eléctrico en los micrófonos

Las limitaciones más importantes son las primeras tres, a continuación, se comentarán brevemente cada una de ellas.

Error por la aproximación de diferencia finita

La exactitud de la aproximación por diferencia finita depende de la distancia de separación y de la longitud de onda (Jacobsen F. , 2014). La limitación fundamental se debe a que el gradiente de presión se aproxima mediante una diferencia finita de presiones en dos puntos discretos, lo que pone un límite de frecuencia superior que es inversamente proporcional a la distancia entre los micrófonos. Ambos micrófonos aproximan la pendiente de una curva a una línea recta entre dos puntos, como se muestra en la figura 4. Si la presión sonora cambia demasiado rápido con la distancia, la estimación será inexacta. Esto ocurrirá si la longitud de onda medida es pequeña en comparación con la separación efectiva del micrófono Δr (Crocker & Arenas, 2003).

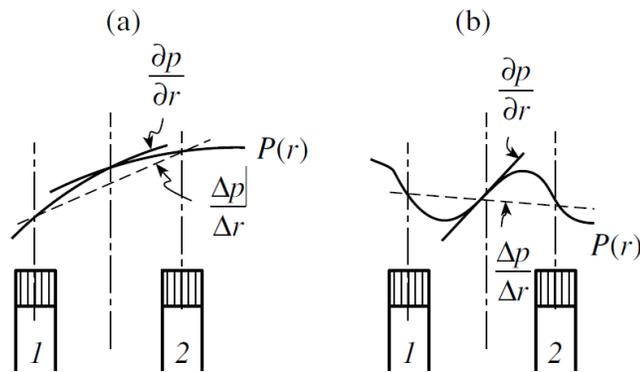


Figura 4. Error por la aproximación de diferencia finita. (a) buena aproximación a bajas frecuencias, (b) pobre aproximación a altas frecuencias (Crocker & Arenas, 2003).

Para una onda sonora plana de incidencia axial, el error de diferencia finita, esto es, la relación entre la intensidad medida \hat{I}_r y la intensidad verdadera I_r , se puede obtener con

$$\frac{\hat{I}_r}{I_r} = \frac{p^2 \sin(k\Delta r)/k\rho c\Delta r}{p^2/\rho c} = \frac{\sin k\Delta r}{k\Delta r} \quad (42)$$

La ecuación anterior muestra que la condición $k\Delta r < 1.15$ asegura que el error es inferior a 1 dB, esto corresponde a un límite superior en frecuencia de alrededor de 5 kHz, si la separación entre micrófonos es de 12 mm, que normalmente se ha considerado como la distancia mínima para dar errores de difracción aceptablemente pequeños con micrófonos de condensador estándar de 1/2 pulgada (Jacobsen, Cutanda, & M. Juhl, 1998).

Errores debidos a la dispersión y a la difracción

La ecuación (42) considera una sonda que no perturba el campo sonoro, ignorando la interferencia que provocan los micrófonos, sin embargo, sería una buena aproximación si los micrófonos fueran pequeños en comparación con la distancia entre ellos, lo cual no es posible para una sonda de intensidad típica (Jacobsen F. , 2011).

Para el caso de la configuración face-to-face se encontró que el efecto de la dispersión y la difracción en combinación con la resonancia de la pequeña cavidad entre el espaciador y el diafragma de cada micrófono no sólo tiende a contrarrestar el error de diferencia finita, sino que, de hecho, para una determinada longitud del espaciador lo anula casi perfectamente en una amplia gama de frecuencias en condiciones de campo sonoro bastante generales.

Jacobsen et al. (2008) demostraron que el límite superior de frecuencia de una sonda de intensidad del tipo “p-p” puede ampliarse hasta aproximadamente una octava por encima del límite determinado por el error de diferencias finitas, si la longitud del espaciador entre los micrófonos es igual al diámetro. La explicación física es que la resonancia de las cavidades frente a los micrófonos da lugar a un aumento de la presión que compensa en cierta medida el error de diferencia finita. Así, el límite superior en frecuencia de una sonda de intensidad sonora compuesta por micrófonos de media pulgada separados por un espaciador de 12 mm es de 10 kHz, que está una octava por encima del límite determinado por el error de diferencia finita cuando se ignora la interferencia de los micrófonos en el campo sonoro. Esto no aplica para la configuración side-by-side.

Por lo anterior, una combinación de micrófonos de 1/2 pulgada y un espaciador de 12 mm es considerada como óptima, y los espaciadores más largos sólo se utilizan cuando el objetivo es exclusivamente las bajas frecuencias. Al utilizar un espaciador más largo con micrófonos de 1/2 pulgada, la resonancia se produce a una frecuencia demasiado alta para ser de ayuda por lo que el error de diferencia finita dominará; así, una sonda de intensidad con un espaciador de 50 mm tiene un límite de frecuencia superior de aproximadamente 1.2 kHz.

Desfasamiento de la instrumentación

Las mediciones de intensidad acústica presentan una importante sensibilidad a las diferencias de fase entre los dos canales del instrumento de medición. El error que genera está compuesto de dos partes:

- El desfasamiento entre los micrófonos, esto implica que ambos micrófonos de la sonda deberán tener la misma respuesta en fase.
- El desfasamiento entre los canales de medición.

El desfasamiento entre los dos canales de medición es la fuente de error más importante en la medición de la intensidad del sonido con sistemas de medición “p-p”. El error de fase provoca un error de sesgo en la intensidad medida, que es proporcional al error de fase φ_{pe} y a la presión media cuadrática (Jacobsen F. , 2011). El error de sesgo ocasionado se puede aproximar con la siguiente ecuación

$$\hat{I}_r \cong I_r - \frac{\varphi_{pe} p_{rms}^2}{k\Delta r \rho c} = I_r \left(1 - \frac{\varphi_{pe} p_{rms}^2 / \rho c}{k\Delta r I_r} \right) \quad (43)$$

Lo ecuación anterior muestra que el efecto de un error de fase es inversamente proporcional a la frecuencia y a la distancia de separación del micrófono, y es proporcional a la relación entre la presión sonora media cuadrática y la intensidad sonora. El desfasamiento será más crítico cuando se utilicen espaciadores pequeños y se trabaje en bajas frecuencias, de igual manera, se presentará de manera importante en campos altamente reactivos. De hecho, el desfasamiento va a definir el límite de frecuencia inferior de las mediciones de intensidad sonora, por lo que, a fin de mantener este error pequeño a bajas frecuencias, es necesario incrementar el espaciamiento entre los micrófonos.

Los errores en las mediciones a bajas frecuencias pueden surgir de factores como el sensado de la presión acústica y velocidad de la partícula a diferentes puntos, y el desfasamiento entre micrófonos, este último un efecto directo en la exactitud de la medición de la velocidad de la partícula. Hay que recordar que el cálculo de la velocidad de la partícula en la técnica de dos micrófonos se basa en la medición del gradiente de fase en vez del módulo del gradiente de presión del campo acústico, de ahí la importancia del error de fase.

Por otro lado, la diferencia en fase está dada por los micrófonos de la sonda y por el analizador de señal utilizado en la medición, por lo que, en este método, existe la condición de que los

micrófonos deberán tener las mismas características en fase para evitar errores de medición relacionados a la intensidad residual; asimismo, deben cumplir con los requerimientos de respuesta de fase establecidos en la norma *IEC 61043 Electroacoustics - Instruments for the measurement of sound intensity - Measurements with pairs of pressure sensing microphones*. El objetivo de esta norma es garantizar la exactitud de las mediciones de intensidad utilizadas para la determinación de la potencia acústica en base a la norma ISO 9614.

El error de fase suele expresarse en términos del llamado índice presión-intensidad residual, el cual se busca que sea lo más grande posible, dicho índice es calculado por medio de la siguiente ecuación.

$$\delta_{pI} = 10 \log \left(\frac{p_{rms}^2 / \rho c}{|I_r|} \right) \quad (44)$$

Por ejemplo, utilizando una instrumentación de alta calidad y una distancia de separación de 12 mm, el índice es de al menos 18 dB arriba de 250 Hz. El índice puede ser aumentado si se utiliza una mayor distancia de separación entre los micrófonos, como se comentó anteriormente, sin embargo, esto entraría en conflicto con la optimización en altas frecuencias.

La ecuación (23) proporciona una forma de medir, y describir, el error de fase. El índice presión-intensidad es un indicador muy importante para la exactitud de una medición, ya que puede estar relacionado con el cambio de fase a través del espaciador. Al medir este índice se puede determinar si el desajuste de fase ocasionará una medición incorrecta. La norma IEC 61043 especifica los requerimientos de exactitud para sondas y analizadores de intensidad acústica, definiendo un mínimo índice presión-intensidad residual con respecto a la frecuencia. Este índice en las mediciones prácticas se obtiene mediante la diferencia entre el nivel de presión acústica y el nivel de intensidad, $\delta_{pI} = L_p - L_I$.

Existen equipos comerciales que permite medir el índice presión-intensidad residual, se basan en exponer los dos micrófonos a la misma presión dentro de una cavidad.

2.6. El principio de medición “p-u”

Con base a lo indicado en 2.5, la sonda “p-u” presenta varias ventajas respecto a la “p-p”: la velocidad de la partícula se obtiene directamente, lo que evita errores por estimación indirecta;

todas las mediciones de banda ancha, por ejemplo de 20 Hz a 20 kHz, pueden realizarse con la misma configuración de la sonda, no es necesario estar utilizando diferentes espaciadores; la sonda “p-u” es relativamente pequeña, se puede utilizar para realizar mediciones muy cerca de superficies radiantes y en espacios pequeños; la zona “p-u” puede utilizarse en entornos con altos niveles de ruido de fondo o reflexiones, donde no es posible utilizar sondas “p-p”, la presencia de ruido de fondo tiene un fuerte efecto en la exactitud de la medición.

Gran parte del siguiente texto fue extraído de la información proporcionada por el fabricante de la sonda (de Bree, 2009).

El sensor de velocidad es un sensor acústico que mide la velocidad de las partículas directamente, a diferencia de los micrófonos que miden la presión sonora, lo hace a través de dos diminutos cables resistivos de platino que son calentados a 200 °C aproximadamente. El intervalo de funcionamiento del sensor va desde de 10 nm/s hasta aproximadamente 1 m/s. La señal de la velocidad de la partícula, en la dirección perpendicular de los alambres, cambia la distribución de la temperatura instantáneamente, porque uno de los cables se enfriará más que el otro por el flujo de aire, esto es lo que permite que la velocidad de la partícula sea vectorial en la dirección a los alambres. La diferencia de resistencia resultante proporciona un ancho de banda y una señal lineal con una direccionalidad en forma de ocho que es proporcional a la velocidad de las partículas hasta niveles sonoros de 135 dB.

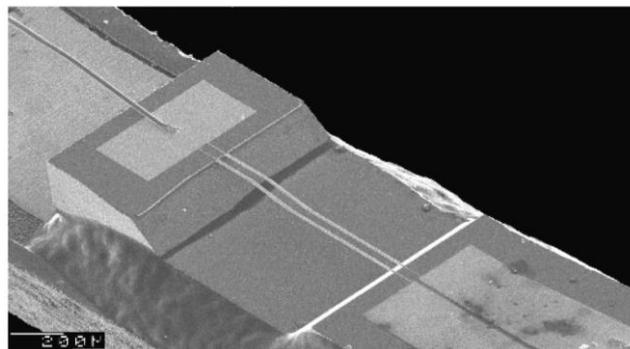


Figura 5. Diseño de la sonda Microflown “p-u” (de Bree, 2009).

Entre la frecuencia de 200 Hz y 1 kHz el transductor presenta una respuesta en frecuencia relativamente plana. Entre 1 kHz y 10 kHz presenta una caída de 6 dB por octava, causada por el efecto de difusión relacionado con la distancia entre los dos hilos. Por encima de 10 kHz, la sensibilidad disminuye otros 6 dB por octava debido a la capacidad térmica de los hilos. A frecuencias más altas, la sensibilidad del sensor disminuye, esto debido a los efectos de

difusión. La compensación de estos efectos se realiza por medio del acondicionador de la sonda.

Principio de funcionamiento

El transductor es un dispositivo micromecánico que consiste en dos cables de platino estrechamente espaciados de 1 mm de longitud, 5 mm de ancho y 200 nm de espesor, que actúan como sensores de temperatura, estos cables están alimentados con una corriente eléctrica que provoca que se calienten (Raangs, 2005). Cuando estos cables se exponen a la corriente de aire, el cable superior se enfriará más rápido por el aire que el cable inferior. Los cambios de temperatura afectan a la resistencia de los cables, y la diferencia de resistencia resultante se mide con un circuito que proporciona una señal proporcional a la velocidad de las partículas (Jacobsen & de Bree, 2005).

Como se puede ver en la figura 6 el transductor de velocidad se encuentra montado en un pequeño cilindro sólido, y el micrófono de condensador está montado dentro de otro cilindro hueco. La geometría de esta disposición aumenta la sensibilidad del transductor de velocidad. La sonda de intensidad de la sonda Microflow es muy pequeña, de hecho, mucho más pequeña que una sonda “p-p” estándar, esto le permite medir muy cerca de una superficie vibrante.

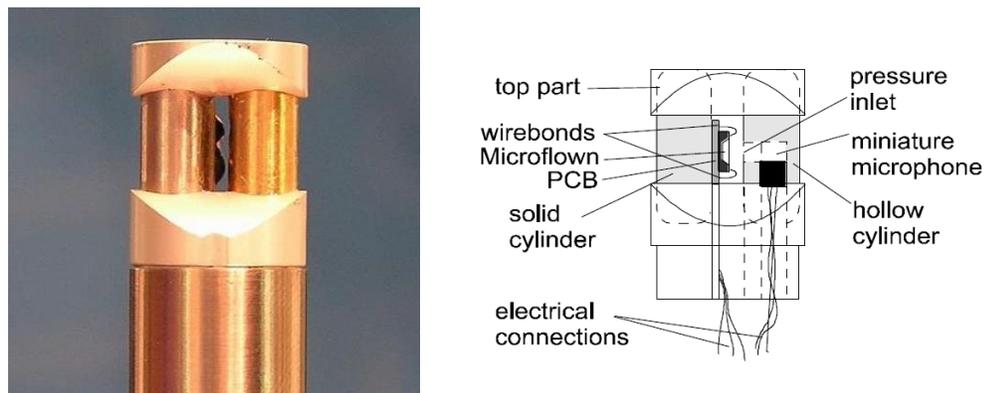


Figura 6. Sonda “p-u” (de Bree, 2009).

Un sistema “p-u” de medición de la intensidad del sonido combina dos transductores fundamentalmente diferentes. La intensidad del sonido es simplemente el promedio en el tiempo del producto instantáneo de la señal de presión y velocidad de la partícula (Jacobsen & de Bree, 2005),

$$I_r = \langle p\mathbf{u}_r \rangle_t = \frac{1}{2} \text{Re}\{p\mathbf{u}_r\} \quad (45)$$

donde $\langle \rangle_t$ indica que se encuentra promediada en el tiempo.

Error de fase

En este sistema existe el problema de que ambos transductores tendrán invariablemente diferentes respuestas en fase, por lo que en las mediciones es necesario realizar la compensación por desfase, de lo contrario habrá errores de medición (Jacobsen & de Bree, 2005). El error de fase se mantiene como la principal fuente de error.

Si se introduce un pequeño error de fase φ_{ue} en la ecuación (45) tenemos

$$\begin{aligned} \hat{I}_r &= \frac{1}{2} \text{Re}(p\mathbf{u}_r e^{-i\varphi_{ue}}) \\ &= \text{Re}[(I_r + iJ_r)(\cos \varphi_{ue} - i \sin \varphi_{ue})] \\ &\approx I_r + \varphi_{ue} J_r \end{aligned} \quad (46)$$

La ecuación anterior muestra que si no se realiza la compensación por desfaseamiento se presentará un importante error de sesgo cuando $J_r \gg I_r$. Pero También indica que se pueden tolerar errores de fase si $J_r \ll I_r$, por ejemplo, con un desfaseamiento de 35° se obtiene un error de sesgo de menos de 1 dB. Por lo anterior, la calibración en fase será crítica cuando las mediciones se realicen en el campo cercano y no lo será cuando se realicen en el campo lejano, por lo que, por lo general mejorará la situación al alejarse de la fuente. Esto señala la importancia que tiene la calibración en fase, principalmente cuando las mediciones se llevan a cabo en condiciones de campo cercano.

Por otro lado, el desfaseamiento no compensado será una fuente potencial de error cuando la reactividad, esto es, cuando la relación entre la integral de superficie de la intensidad reactiva y la integral de superficie de la intensidad activa es grande, lo cual ocurre a bajas frecuencias cuando la superficie de medición está cerca de la fuente. Por lo tanto, la reactividad es un importante indicador de error para las sondas tipo “p-u”, por el contrario, el índice de presión-intensidad no es relevante para las sondas “p-u” (Jacobsen F. , 2014).

Otra fuente de error de este tipo de sonda es el flujo de aire, particularmente el flujo inestable, debido a que la velocidad resultante no puede distinguirse de la velocidad asociada a las ondas

sonoras, sin embargo, las pantallas de viento utilizadas directamente en el transductor reducen el problema.

3. Estado del arte

3.1. Estimación de potencia acústica

Existen diferentes técnicas para obtener la potencia acústica de una fuente, dentro de las más conocidas está la que se basa en mediciones de presión acústica. Esta técnica tiene la característica de que es dependiente del campo sonoro donde se realiza, como cámaras anecoicas o reverberantes. Los diferentes métodos están descritos en una serie de normas internacionales que se describen en la norma ISO 3740:2019 Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources — Guidelines for the use of basic standards.

Por otro lado, se encuentran las técnicas de intensidad acústica, que permiten realizar mediciones en entornos no controlados, a diferencia de la técnica de presión. Dentro de esta técnica existen dos métodos, como ya se había mencionado anteriormente, el método “p-p” y el método “p-u”, en el que se enfoca este trabajo. En el primer caso, existe la serie de normas ISO 9614 Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity, donde se describen tres métodos. Para el método “p-u” no existen aún técnicas normalizadas para la determinación de potencia acústica, sin embargo, se pueden utilizar los métodos “p-p” con algunas modificaciones, como se verá más adelante.

Dentro de las aplicaciones más utilizadas de la intensidad acústica, se encuentra la identificación y clasificación de fuentes de ruido. Las técnicas de identificación de fuentes de ruido (NSI) se utilizan para optimizar la emisión de ruido de una amplia gama de productos. El objetivo del NSI es identificar las subfuentes más importantes en un objeto en términos de posición, contenido de frecuencia y sonido radiación de energía. La clasificación de las subfuentes puede entonces ser utilizada para identificar dónde los cambios de diseño mejorarán más eficazmente la radiación de ruido en general (Bernard Ginn & Haddad, 2012).

Trabajos más recientes, particularmente en la industria automotriz se han centrado en el sonido de los motores y otros componentes automovilísticos para crear un sonido deseable para el consumidor. Del mismo modo, los productos de consumo se han estudiado en un esfuerzo por eliminar los sonidos que el consumidor encuentra desagradable y enfatizar sonidos que dan una buena impresión de la calidad del producto (Maling Jr., 2007).

Hasta antes de la llegada del sensor Microflown, no se existía un transductor confiable que midiera directamente la velocidad de la partícula. Hubo varios intentos, por ejemplo, el disco de Rayleigh y los micrófonos de velocidad (Raangs, 2005). Incluso, la empresa Norwegian

Electronics produjo por algunos años una sonda de intensidad “p-u” que utilizaba un micrófono de presión y un transductor basado en la convección de un haz ultrasónico por el flujo de velocidad de las partículas, sin embargo, era muy sensible al flujo de aire y difícil de calibrar, además de su tamaño, por lo que se dejó de producir a mediados de los años noventa (Jacobsen F. , 2014). Fue hasta la invención del Microflown en 1994 que se contó con un sensor confiable.

3.2. Calibración de la sonda “p-u”

Jacobsen & Jaud (2006) hacen una descripción detallada del principio de medición, se toma este trabajo como base para describirlo en este punto. La calibración de una sonda de intensidad “p-u” implica exponerla a un campo sonoro con una relación conocida entre el sonido la presión y la velocidad de las partículas. Debido a que ambos transductores son completamente diferentes no tendrán la misma respuesta de amplitud y fase, por lo que se tiene que determinar una corrección de uno de ellos respecto al otro y dado que ya existe bastante conocimiento acerca del comportamiento de los micrófonos, la elección es calibrar el transductor de velocidad en relación con al transductor de presión. El problema es pues, la calibración del sensor de velocidad, dada la carencia de sensores normalizados con cuales se pueda comparar, es difícil darle trazabilidad metrológica.

La intensidad acústica compleja se puede expresar en términos del espectro cruzado entre la presión del sonido y la velocidad de las partículas, esto es,

$$\mathbf{I}_r + j\mathbf{J}_r = \mathbf{S}_{pu} \quad (47)$$

Sin embargo, no es posible obtener directamente la velocidad de la partícula, por lo que la señal de este transductor debe corregirse en fase y en amplitud multiplicándola por una función de transferencia compleja, $\mathbf{H}_{\hat{u}u}$. Para determinar esta función, se puede exponer la sonda a un campo acústico en el que se conozca la impedancia acústica específica (la relación entre la amplitud compleja de una componente de frecuencia individual de la presión sonora, y la amplitud compleja de la componente asociada de la velocidad de las partículas (Fahy, 1995)). Así, la relación entre la admitancia acústica específica real en el campo sonoro en la posición en que se coloca la sonda durante la calibración, \mathbf{H}_{pu} , a la correspondiente respuesta en frecuencia medida entre las señales de la sonda, $\mathbf{H}_{p\hat{u}}$, proporciona la corrección de la señal de velocidad de las partículas en relación con la señal de presión (Jacobsen & Jaud, 2006).

$$S_{p\hat{u}}H_{\hat{u}u} = S_{p\hat{u}} \frac{H_{pu}}{H_{p\hat{u}}} = S_{pu} = I_r + jI_r \quad (48)$$

Se han propuesto varios métodos para la calibración de este tipo de sondas, con diferentes características cada uno. Jacobsen & Jaud (2006) examinaron algunos de ellos:

3.2.1. Calibración en campo lejano geométrico

Este método plantea exponer la sonda a una onda plana, en donde la admitancia acústica específica es igual al recíproco de la impedancia característica del medio. Sin embargo, de acuerdo con Jacobsen (2005), no se pueden obtener condiciones de onda plana a bajas frecuencias aún en la cámara más grande, por lo que es necesario corregir el cambio de fase y amplitud asociado con una distancia finita a la fuente. Debido a que ningún altavoz convencional se asemeja a un monopolo en su campo cercano, se necesita una distancia de varios metros. Por lo anterior, con este método es necesario utilizar una fuente muy especial o una cámara anecoica grande de alta calidad a fin de realizar la calibración de manera adecuada.

3.2.2. Un monopolo en un bafle plano rígido

Este método se basa en la posibilidad de utilizar un monopolo real, bajo esta condición incluso se podría realizar la calibración sin la utilización de una cámara anecoica, sin embargo, su construcción resulta difícil. Un monopolo es una fuente que radia el sonido en todas direcciones por igual. En la práctica, cualquier fuente sonora cuyas dimensiones sean mucho menores que la longitud de onda del sonido radiado actuará como un monopolo (A. Russell, P. Titlow, & Bemmen, 1999). La relación entre la longitud de onda y la dimensión de un monopolo se expresa como $ka \ll 1$, donde a es una dimensión característica de la fuente. La figura siguiente muestra el patrón de directividad teórico de niveles de presión sonora radiados por un monopolo en el campo lejano.

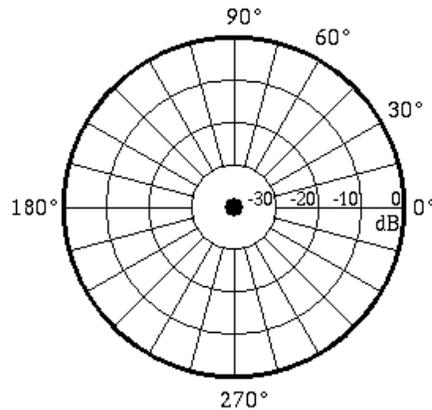


Figura 7. Patrón de directividad de niveles de presión sonora radiados por un monopolo A. (Russell, P. Titlow, & Bemmen, 1999).

Jacobsen & Jaud (2006) comentan que se podría construir utilizando un baffle plano grande con un pequeño agujero circular y un altavoz en su interior, así se generaría un campo sonoro esférico enfrente del altavoz, en donde se colocaría, a cierta distancia la sonda. Sin embargo, en la práctica, el notable aumento del nivel de velocidad de las partículas en relación con el nivel de presión del sonido, la necesidad de una distancia bien definida entre el agujero y el transductor, la influencia de la dispersión causada por el transductor y la influencia de las reflexiones de los bordes del baffle exigen consideraciones adicionales.

3.2.3. Un monopolo en un baffle esférico rígido

En este método se sugiere utilizar un baffle esférico, en lugar de uno plano propuesto en el método anterior, con el fin de evitar las reflexiones provocadas por los bordes del baffle plano. En este tipo de baffle la admitancia acústica en una posición dada delante de él es mayor a bajas frecuencias que en un baffle plano, esto por el hecho de que el centro acústico de un monopolo en una esfera está delante de la fuente, mientras que el centro acústico de un monopolo en un deflector plano coincide con la fuente.

Jacobsen & Jaud (2006) mencionan que con este tipo de fuente se podría realizar la calibración absoluta del transductor de velocidad utilizando la presión del sonido detrás del altavoz como referencia. Esta presión, que se podría medir con un micrófono de condensador calibrado dentro de la esfera, es proporcional al desplazamiento del volumen.

En (2008) de Bree realizó una extensión de este método para frecuencias más bajas obteniendo buenos resultados, colocando el micrófono de referencia dentro del altavoz. Además, realizó la calibración fuera de una cámara anecoica. Para ello utilizó dos tamaños de fuentes esféricas. La calibración se basa en el hecho de que la velocidad de la partícula, muy cerca de un objeto vibrante, es similar a la vibración del objeto (H. Basten & de Bree, 2009).

3.2.4. Métodos basados en un tubo de impedancia

Otra de las opciones analizadas por Jacobsen & Jaud (2006) es la utilización de un tubo de onda estacionaria con terminación rígida. El problema con este método es que se cubre un intervalo de frecuencias relativamente corto. Sugiere que de forma alternativa se podría medir la respuesta en frecuencia entre la señal de la velocidad de la partícula y la presión del sonido en la terminación rígida utilizando un micrófono de referencia, para después compensar la diferencia entre el canal de presión y el micrófono de referencia, colocando la sonda junto al micrófono de referencia en una medición posterior.

Por otra parte, Koop (2010) propone un método en el que se pueden obtener los niveles absolutos de velocidad de la partícula (no sería con respecto al transductor de presión) mediante un sistema de velocimetría de imagen de partículas (PIV por sus siglas en inglés). La ventaja de este método es que se obtienen mediciones en un amplio intervalo de frecuencias, 16 Hz a 6 300 Hz, además de que es independiente del campo sonoro donde se realice, es decir no se necesitarían un recinto especial como una cámara anecoica.

4. Desarrollo del sistema de medición de intensidad acústica

En este apartado se describe el desarrollo del sistema de medición, el cual se conforma por tres partes principales:

1. El método de calibración.
2. El método de medición.
3. La validación del sistema de medición.

A continuación, se describen cada una de estas partes.

4.1. Desarrollo del método de calibración de la sonda “p-u”

4.1.1. Introducción

Con la calibración de la sonda se busca determinar la sensibilidad de ambos transductores, para el transductor de presión acústica, cuál es la tensión eléctrica de salida cuando se le aplica una determinada señal acústica, es decir, cuantos Volts de salida por Pascal de entrada, se expresa en mV/Pa. Para el transductor de la velocidad de la partícula, hay que determinar la tensión de salida en relación con la velocidad de las partículas de aire, esto es, cuántos Volts salen por metro por segundo de entrada de velocidad de las partículas, en este caso la sensibilidad se expresa en mV/(m/s). De manera adicional, además de determinar las sensibilidades para ambos transductores, es necesario también determinar su relación de fase.

Dada la diferencia entre unidades y con el fin de tener compatibilidad con las normas de acústica, así como poder comparar la sensibilidad del sensor de velocidad y el micrófono, Microflown define una nueva unidad a la que llama Pa*, la cual representa la velocidad de las partículas que corresponde con una presión acústica de 1 Pa en una onda plana sin reflexiones, es decir, $1 \text{ Pa}^* = 1 \text{ Pa}/\rho c = 2.4 \text{ mm/s}$ [10]. Para realizar la conversión de V/(m/s) a mV/Pa* basta con dividir V/(m/s) por el valor de $((343 \cdot 1.2) / 1000)$.

Como se indica en 3.2, se han propuesto diferentes métodos de calibración, sin embargo, Microflown sugiere dos métodos como estándar: un método en el que utiliza un altavoz esférico y un micrófono de referencia, y otro método en el que se utiliza un tubo de onda estacionaria. En el presente trabajo será el método del altavoz esférico el que se implementará para desarrollar la calibración, se ha elegido este método debido a que es el que más se sugiere en la literatura [9, 15, 18], además, en CENAM se cuenta con los equipos e instalaciones necesarias para realizarlo.

Para este método Jacobsen & Jaud (2006) proponen el uso de una cámara anecoica, el método se basa en el cálculo de la impedancia acústica específica (la relación entre la presión acústica y la velocidad de la partícula) a una determinada distancia de un altavoz esférico, midiendo la presión acústica con un micrófono de referencia se puede calcular la velocidad de la partícula. Esto es posible en condiciones de campo libre y para altas frecuencias, debido a que la impedancia acústica específica se mantiene constante si la distancia al altavoz es grande comparada con la longitud de onda. Sin embargo, para bajas frecuencias (inferiores a 100 Hz), este método ya no es factible debido a que no es posible alejarse de la fuente y las paredes de la sala anecoica no son completamente absorbentes a bajas frecuencias, por lo que se recomienda solo para frecuencias arriba de 50 Hz – 100 Hz.

Para la calibración a bajas frecuencias, H. Basten, T. G., y de Bree, H.-E. en (2009) demuestran que es posible ampliar el método propuesto por Jacobsen & Jaud (2006) colocando el micrófono de referencia dentro de la fuente esférica, método conocido como pistón en una esfera, en estas frecuencias, la presión acústica dentro de la esfera es proporcional al movimiento de la membrana del altavoz, por lo que midiendo el movimiento es posible deducir la velocidad de las partículas delante del altavoz.

De esta manera, se puede realizar la calibración en el ancho de banda completo, además de que, como lo demuestran, H. Basten, T. G., y de Bree, H.-E. (2010), ambos métodos pueden ser implementados en un recinto normal, es decir, sin la necesidad de una cámara anecoica.

El intervalo de frecuencia en el que trabaja este método va a depender de dos factores principales: el ruido de fondo presente en la sala de calibración, es decir, una cámara anecoica o una sala común; y de la calidad y ancho de banda de la fuente utilizada. De Bree (2009) menciona que el intervalo de calibración completo puede ser de 20 Hz a 20 kHz, sin embargo, la sonda cuenta con una maya de protección que aumenta la sensibilidad del sensor de velocidad de las partículas, pero a su vez la limita a utilizarla hasta una frecuencia útil de 10 kHz, ya que por arriba de estas frecuencias la maya tiene una influencia significativa en el campo sonoro medido (H. Basten & de Bree, 2009).

Para realizar la calibración en el intervalo de frecuencia completo, la calibración se realiza en dos partes: una calibración para bajas frecuencias, aproximadamente de 20 a 1000 Hz, y otra para altas frecuencias, 20 Hz a 10 kHz, posteriormente ambas partes se combinan para obtener el intervalo en frecuencia completo. A continuación, se describen ambas partes.

4.1.2. Calibración para altas frecuencias

Para realizar esta calibración es necesario utilizar una fuente acústica monopolo, a fin de tener una fuente omnidireccional en un gran ancho de banda, para ello se utiliza una bocina colocada dentro de una esfera de plástico. La fuente esférica se modela como una esfera de radio a y un pistón con radio b . De esta manera, la impedancia acústica sobre el eje del altavoz, es decir, la relación entre la presión acústica y la velocidad de la partícula se puede obtener por medio de la siguiente ecuación (de Bree, 2009)

$$z_{esfera}(r) = i\rho c \frac{\sum_{m=0}^{\infty} (P_{m-1}(\cos \alpha)) \frac{h_m(kr)}{h'_m(ka)}}{\sum_{m=0}^{\infty} (P_{m-1}(\cos \alpha)) \frac{h'_m(kr)}{h'_m(ka)}} \quad (49)$$

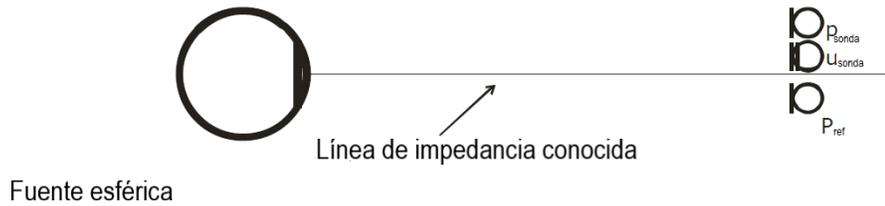


Figura 8. Arreglo para calibración en altas frecuencias.

La impedancia calculada con la ecuación anterior es muy similar a la impedancia acústica de una fuente monopolo obtenida por medio de la ecuación siguiente

$$Z(r) = \rho c \frac{ikr}{1 + ikr} \quad (50)$$

Esta ecuación será utilizada en los cálculos de la sensibilidad del sensor de velocidad.

Durante la calibración no es posible conocer los valores exactos de la densidad ρ y de la velocidad del sonido en el aire c , pero si es posible conocer la presión acústica, ya que es medida con el micrófono de referencia, por lo que los resultados de la calibración serán normalizados con la impedancia específica ρc , de esta manera, la calibración será independiente de las condiciones ambientales.

La prueba consiste en excitar la fuente con ruido blanco en el intervalo de frecuencia determinado, a la vez que se mide la función de transferencia entre los sensores, esto es, entre el sensor de presión acústica de la sonda y el micrófono de referencia y entre el sensor

de velocidad de la sonda y el micrófono de referencia. De esta manera, la razón de la tensión de salida del micrófono de referencia (V), y la salida del sensor de presión de la sonda (V) multiplicada por la sensibilidad del micrófono de referencia proporcionará la sensibilidad del sensor de presión de la sonda S_p (mV/Pa):

$$S_p \left[\frac{mV}{Pa} \right] = \frac{p_s}{p_{mref}} \left[\frac{V}{V} \right] \cdot S_{ref} \left[\frac{mV}{Pa} \right] \quad (51)$$

Para el sensor de velocidad el procedimiento es diferente, ya que no puede relacionarse directamente a la salida del micrófono de referencia, en este caso, se utilizará la ecuación de la impedancia acústica por medio de la relación siguiente:

$$S_u \left[\frac{mV}{Pa^*} \right] = \frac{u_s}{p_{mref}} \left[\frac{V}{V} \right] \cdot Z_{esfera} \left[\frac{Pa}{Pa^*} \right] \cdot S_{ref} \left[\frac{mV}{Pa} \right] \quad (52)$$

De esta manera, se obtiene la sensibilidad del sensor de presión para el intervalo de frecuencia completo y la sensibilidad del sensor de velocidad para el intervalo de altas frecuencias.

4.1.3. Calibración para bajas frecuencias

Debido al ruido de fondo, no es posible aplicar la ecuación (52), en estas frecuencias los niveles de ruido de fondo llegan a ser más grandes que los niveles emitidos por el propio altavoz, por lo que, en este arreglo, figura 9, el micrófono de referencia se coloca dentro de la esfera y medirá el nivel de presión acústica en su interior, así, existe una relación lineal entre la presión interna y la velocidad de las partículas delante de la esfera, la cuál será utilizada para realizar la calibración.

En bajas frecuencias, la presión en el interior de la membrana está relacionada de manera lineal con la velocidad de la membrana del altavoz, por lo que, considerando la condición de continuidad, la velocidad de las partículas justo enfrente de la membrana será similar a la velocidad de la membrana. Así, la relación entre la presión sonora dentro de la esfera y la velocidad de la partícula enfrente de ésta se da por la siguiente ecuación (de Bree, 2009):

$$\mathbf{u}_{piston} = -\frac{i\omega V_0}{\gamma A_0 p_0} p_{mref} \quad (53)$$

$\gamma = 1.4$ para el aire

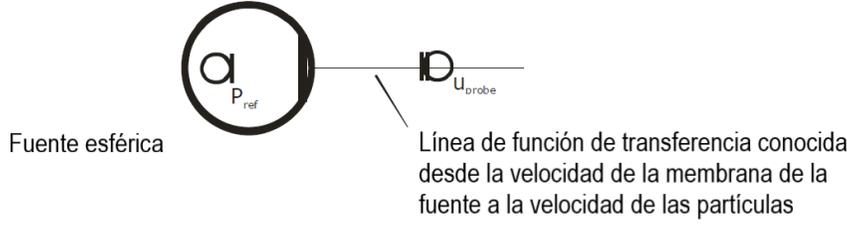


Figura 9. Arreglo para calibración en bajas frecuencias.

Dado que la relación anterior permite conocer la velocidad de las partículas justo enfrente del pistón, es posible deducir la velocidad de las partículas a una determinada distancia de la esfera, así, la relación entre la velocidad de la partícula justo enfrente del pistón, que es igual a la velocidad normal del pistón (u_n) y la velocidad de las partículas a una distancia r del centro de la esfera se da por la ecuación.

$$\mathbf{u}(r) = -\frac{\mathbf{u}_n}{2} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} (P_{m-1}(\cos \alpha) - P_{m+1}(\cos \alpha)) \frac{h'_m(kr)}{h'_m(ka)} \quad (54)$$

De esta manera, combinando las ecuaciones (69) y (70) se puede obtener la relación entre la velocidad de las partículas en la posición r y la presión en la fuente (Martina, 2014).

$$\frac{\mathbf{u}(r)}{p_{ref}} = \frac{j\omega V_0}{2\gamma A_0 p_0} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} (P_{m-1}(\cos \alpha) - P_{m+1}(\cos \alpha)) \frac{h'_m(kr)}{h'_m(ka)} \quad (55)$$

El procedimiento de medición es el mismo que en la calibración a altas frecuencias, la fuente es excitada con ruido blanco y se miden las funciones de transferencia, la sensibilidad se obtiene en base a las ecuaciones (69) y (70), esto es

$$\begin{aligned} S_u \left[\frac{mV}{Pa^*} \right] &= \frac{u_s}{P_{mref}} \left[\frac{V}{V} \right] \cdot \frac{u_n}{u} \left[\frac{Pa^*}{Pa^*} \right] \cdot \frac{P_{mref}}{u_n} \left[\frac{Pa}{Pa^*} \right] \cdot S_{ref} \left[\frac{mV}{Pa} \right] \\ &= \frac{u_s}{P_{mref}} \left[\frac{V}{V} \right] \cdot \frac{P_{mref}}{u_r} \left[\frac{Pa}{Pa^*} \right] \cdot S_{ref} \left[\frac{mV}{Pa} \right] \end{aligned} \quad (56)$$

Después de determinar la curva de sensibilidad en ambas calibraciones, por medio de las ecuaciones anteriores, es recomendable realizar un suavizado de las curvas a fin de eliminar las pequeñas ondulaciones.

4.1.4. Combinación de los métodos de bajas y altas frecuencias

El último paso para obtener el intervalo de frecuencia completo del sensor de velocidad es combinar las dos calibraciones, en ambas calibraciones se asume que deberían de dar resultados similares en el intervalo de medias frecuencias, alrededor de 300 Hz, por lo que la curva de bajas frecuencias se desplaza verticalmente hasta que coincida con la curva de altas frecuencias alrededor de esta frecuencia.

4.1.5. Modelo eléctrico de la sonda de intensidad “p-u”

A pesar de mostrar un procedimiento experimental para obtener una curva de sensibilidad, el fabricante recomienda que para aplicaciones prácticas es conveniente utilizar, de manera adicional, un modelo analítico y ajustar el resultado a la curva de calibración medida (G. Tijs, Nejade, & de Bree, 2009), para tal efecto, Microflown desarrolló un modelo empírico de la sonda que describe su comportamiento en función de la frecuencia, para describirlo solo basta con determinar un conjunto de parámetros específicos por medio de curvas de ajuste. En la figura 10 se muestra el diagrama eléctrico del modelo.

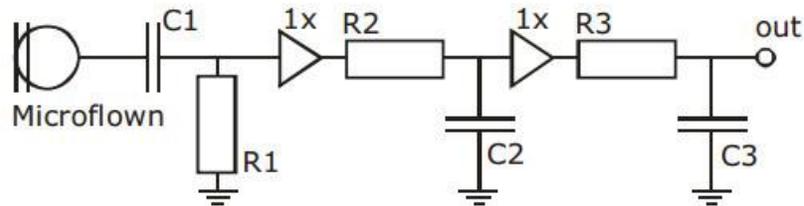


Figura 10. Modelo eléctrico de la sonda Microflown (de Bree, 2009).

El modelo incluye tres filtros: un filtro pasa altas R_1C_1 con una frecuencia de corte (la frecuencia a partir de la cual la respuesta en frecuencia decae 3 dB) de alrededor de 100 Hz, un primer filtro pasa bajas R_2C_2 que representa los efectos de difusión a una frecuencia de corte de 1 kHz y un segundo filtro pasa bajas R_3C_3 que representa la masa térmica de los cables del sensor y que tiene una frecuencia de corte de alrededor de 10 kHz.

De esta manera, la sensibilidad del sensor de presión se describe por medio de la ecuación (57):

$$S_p[mV/Pa] = S_p@1kHz \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{c3p}}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{c1p}}{f}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{c2p}}{2}\right)^2}} \quad (57)$$

De igual manera, la fase del micrófono de presión se describe con la ecuación (73):

$$\varphi_p[grados] = \arctan\left(\frac{C_{1p}}{f}\right) + \arctan\left(\frac{C_{2p}}{f}\right) + \arctan\left(\frac{f}{C_{3p}}\right) + 180 \quad (58)$$

La sensibilidad del sensor de velocidad, sin corrección, se describe por medio de la ecuación siguiente:

$$S_u[V/(m/s)] = \frac{S_u@250Hz}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{c1u}}{f}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{c2u}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{c3u}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{c4u}}{2}\right)^2}} \quad (59)$$

Y la fase del sensor de velocidad se describe con la ecuación:

$$\varphi_u[grados] = \arctan\left(\frac{C_{1u}}{f}\right) - \arctan\left(\frac{f}{C_{2u}}\right) - \arctan\left(\frac{f}{C_{3u}}\right) + \arctan\left(\frac{C_{4u}}{f}\right) \quad (60)$$

Para estas dos últimas ecuaciones, al igualar la señal de velocidad en amplitud y fase, la presión y la velocidad tendrán la misma fase, con corrección, y en este caso la ecuación será:

$$S_u[V/(m/s)] = \frac{S_u@250Hz}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{c1u}}{f}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{c4u}}{f}\right)^2}} \quad (61)$$

Y la fase del sensor de velocidad corregida se determinará por la ecuación:

$$\varphi_u[grados] = \arctan\left(\frac{C_{1u}}{f}\right) + \arctan\left(\frac{C_{4u}}{f}\right) \quad (62)$$

El fabricante incluye en el certificado de la sonda todos los parámetros indicados en las ecuaciones anteriores para ambos sensores, ya que estos parámetros son propios de cada sonda, por lo que basta con sustituir estos parámetros y la sensibilidad a 1 kHz para el sensor

de presión y a 250 Hz para el sensor de velocidad obtenida en la calibración, para obtener la sensibilidad de los sensores en todo el intervalo de frecuencia.

4.1.6. Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la calibración experimental de la sonda. Se hace una descripción del recinto donde se realizó la calibración, de igual forma, se indica el equipo utilizado, su descripción y configuración, así como las características del montaje de la sonda y la fuente acústica durante la calibración.

Posteriormente se muestran los resultados para diferentes condiciones y los resultados comparados con los valores de sensibilidad reportados en el certificado de calibración proporcionado por el fabricante de la sonda.

4.1.6.1. Infraestructura empleada en la calibración

La calibración de la sonda fue realizada en la cámara anecoica de la Dirección de Vibraciones y Acústica del Centro Nacional de Metrología. Una cámara anecoica es un recinto diseñado para absorber la energía acústica que incide sobre sus fronteras, esto es paredes, piso y techo, creando de esta manera condiciones de campo libre. Sus fronteras se encuentran cubiertas con material acústicamente absorbente, generalmente en forma de cuñas triangulares, este material absorbe cualquier sonido que llegue a ellas evitando que rebote y se refleje en diferentes direcciones. El piso suele estar formado por una malla de alambre que permite caminar sobre las cuñas colocadas en el piso, de igual manera, las cámaras se encuentran aisladas del ruido exterior para evitar que se filtre hacia el interior, de manera adicional, se encuentran montadas sobre soportes especiales que evitan la transmisión de ruido o vibraciones no deseadas.

Los niveles de ruido de fondo en su interior permiten realizar mediciones con mayor precisión, así como mediciones de fuentes de ruido con niveles muy bajos.

Las dimensiones de la cámara anecoica son las siguientes:

Tabla 1. Dimensiones de la cámara anecoica.

Dimensiones	Ancho, [cm]	Largo, [cm]	Alto, [cm]
Interior	335	304	345
Exterior	484	427	396

Una de las principales características de las cámaras anecoicas es su alcance en frecuencia, para el caso de la cámara del CENAM su alcance es de 250 Hz a 50 000 Hz.

Aunque de Bree (2009) menciona que la calibración se puede realizar en cualquier recinto, se decidió realizarla dentro de la cámara anecoica de CENAM a fin de aprovechar que se cuenta con esta infraestructura, además de diversos factores como el tratar de alcanzar la frecuencia de medición más baja posible, evitar los problemas generados por el ruido de fondo y evitar las reflexiones del recinto que hubiera implicado realizar un tratamiento posterior a las señales.

4.1.6.2. Montaje y condiciones de prueba

En la figura 11 se muestra el arreglo utilizado para realizar esta calibración, Para realizar el montaje de la sonda y la fuente se utilizó una estructura de metal construida de varillas de metal de 5 mm de diámetro con la finalidad de que fueran acústicamente transparentes, es decir, que no modificaran el campo sonoro. La estructura fue colocada en el centro geométrico de la cámara con el fin de obtener las mejores condiciones acústicas de la cámara.

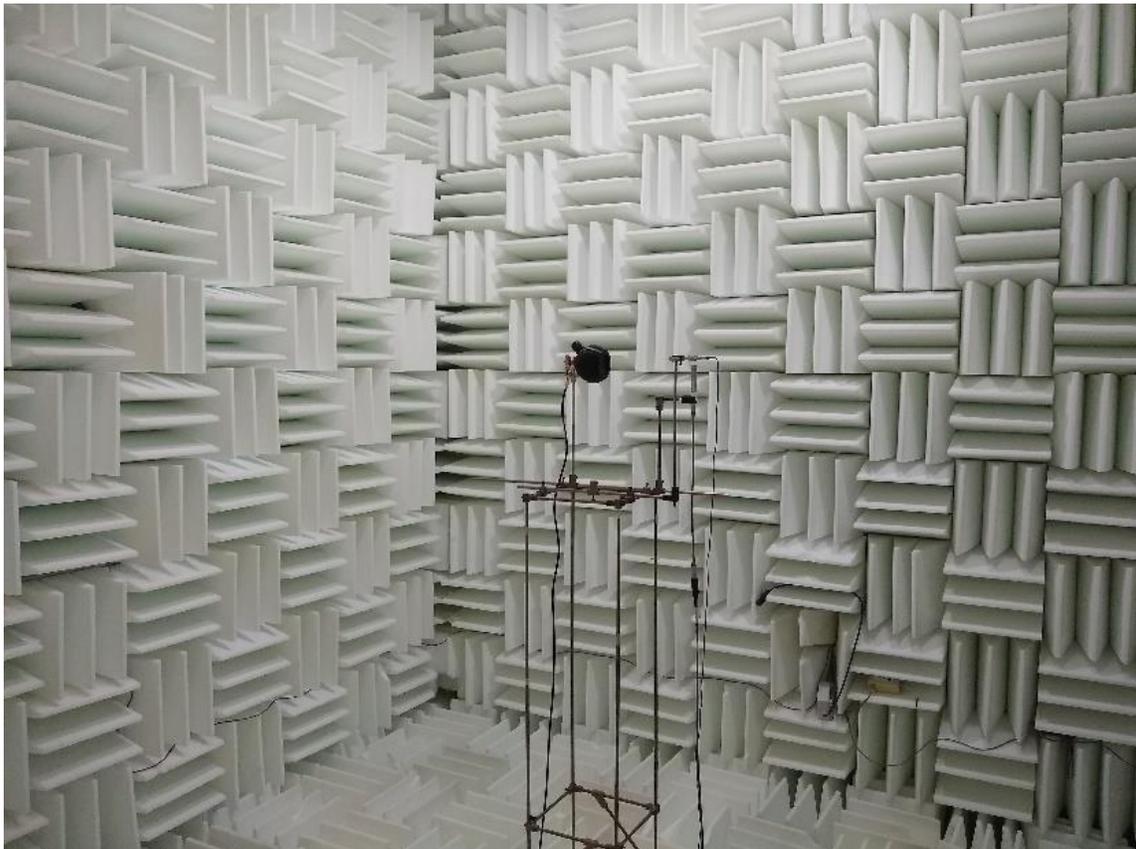


Figura 11. Colocación del arreglo en el centro de la cámara anecoica.

4.1.6.3. Configuración para medias y altas frecuencias

La sonda a calibrar es colocada a cierta distancia con respecto al centro de la esfera que contiene el altavoz y cercana a ella, de forma perpendicular, es colocado el micrófono de referencia. Aunque existen trabajos donde se muestra la sonda en línea recta con respecto al eje de la fuente, también existen donde se muestra una colocación de forma perpendicular. Para determinar la mejor dirección, se hicieron varias pruebas con ambas configuraciones, ver figura 12 y 13.



Figura 12. Arreglo para calibración en altas frecuencias en línea recta.



Figura 13. Arreglo para calibración en altas frecuencias perpendicular.

La distancia de medición utilizada para ese tamaño de fuente fue de 22 cm, como lo recomiendan diversas fuentes.

4.1.6.4. Configuración para bajas frecuencias

Al igual que el caso anterior, se hicieron pruebas colocando la sonda en posición lineal y perpendicular respecto al eje de la fuente, figura 14, nuevamente los mejores resultados se obtuvieron colocando la sonda en dirección perpendicular respecto al eje de la fuente. La distancia de medición utilizada entre la sonda y la fuente fue de 4 cm, también por recomendaciones de la literatura.



Figura 14. Arreglos para calibración en bajas frecuencias.

4.1.6.5. Equipo de medición empleado

A continuación, se describe brevemente parte de la instrumentación utilizada.

Micrófono

El equipo utilizado en la calibración de la sonda de intensidad forma parte de la instrumentación con la que cuenta la Dirección de Vibraciones y Acústica en sus diferentes laboratorios. Dentro de los instrumentos empleados, el micrófono juega un papel muy importante en la cadena de medición, ya que es el transductor que se utiliza como referencia y que permite dar trazabilidad a los resultados de la medición. El micrófono utilizado es del tipo de condensador, este tipo de micrófonos son empleado debido a que funcionan de manera similar a como lo hace el oído humano, es decir, detectan cambios en la presión, además presentan una alta estabilidad. En mediciones de alta exactitud se suelen utilizar micrófonos de condensador.

Uno de los principales parámetros de los micrófonos es su sensibilidad, definida como la relación entre el parámetro de salida y el parámetro de entrada, en este caso, la tensión eléctrica de salida que produce por la presión acústica de entrada es expresada en mV/Pa o en dB re 1 V/Pa. La sensibilidad de un micrófono es dependiente de la frecuencia, debido a esto, otro de los parámetros importantes es su respuesta en frecuencia, esto es, su sensibilidad en todo el intervalo de frecuencia se expresa en decibeles en relación con la sensibilidad a 250 Hz.

En base a su respuesta en un campo sonoro, los micrófonos se dividen en micrófonos de presión, de campo libre y de campo difuso. Los micrófonos son construidos de manera que su respuesta sea plana en el campo sonoro utilizado. En la calibración de un micrófono se estima su sensibilidad y su respuesta en frecuencia. El micrófono utilizado fue calibrado por el Laboratorio de Sonometría y Electroacústica del CENAM antes de su utilización, con la información contenida en su certificado de calibración, esto es, su sensibilidad a 250 Hz y su respuesta a la frecuencia de 10 Hz a 20 kHz, se estimó la sensibilidad para cada una de las frecuencias de medición utilizadas durante la calibración, un total de 2498 frecuencias. La sensibilidad del micrófono a estas frecuencias se utilizó en los cálculos de la sensibilidad de los transductores de la sonda.

La tabla 6 muestra las características del micrófono utilizado.

Fuente acústica

De acuerdo con de Bree (2009), cuando las dimensiones de la esfera son pequeñas, la fuente se asemeja más a un modelo de fuente monopolar, por lo que para la calibración se adquirió una bocina con un diámetro de 4.5 cm, además se diseñó y construyó utilizando una impresora 3D, una esfera de 9 cm de diámetro, de acuerdo a las dimensiones que sugiere de Bree (2009). La esfera cuenta con un orificio que permite colocar el micrófono de referencia dentro de ésta, como se indica en la configuración de la calibración a bajas frecuencias.

Tabla 2. Características del micrófono Brüel & Kjær 4133.

Marca	Brüel & Kjær
Modelo	4133
No. de serie	2050104
Diámetro nominal	1/2"
Tipo de respuesta	Campo libre
Intervalo de frecuencia	4 Hz a 40 Hz
Sensibilidad (250 Hz)	11.74 (mV/Pa)

En la tabla 3 se muestra la lista completa de instrumentos empleados para realizar la calibración de la sonda.

Tabla 3. instrumentos empleados en la calibración de la sonda.

Instrumento	Marca	Modelo
Micrófono	Brüel & Kjær	4133
Preamplificador	Brüel & Kjær	2669
Fuente de alimentación para micrófono	Brüel & Kjær	2829
Amplificador	Brüel & Kjær	2706
Módulo de adquisición	Brüel & Kjær	3160-A-4/2
Software de adquisición de las señales	Brüel & Kjær	Pulse LabShop

Para la sonda se utilizó su propio acondicionador Marca Microflown modelo MFPA2. La instrumentación empleada para la calibración se muestra en la figura 15

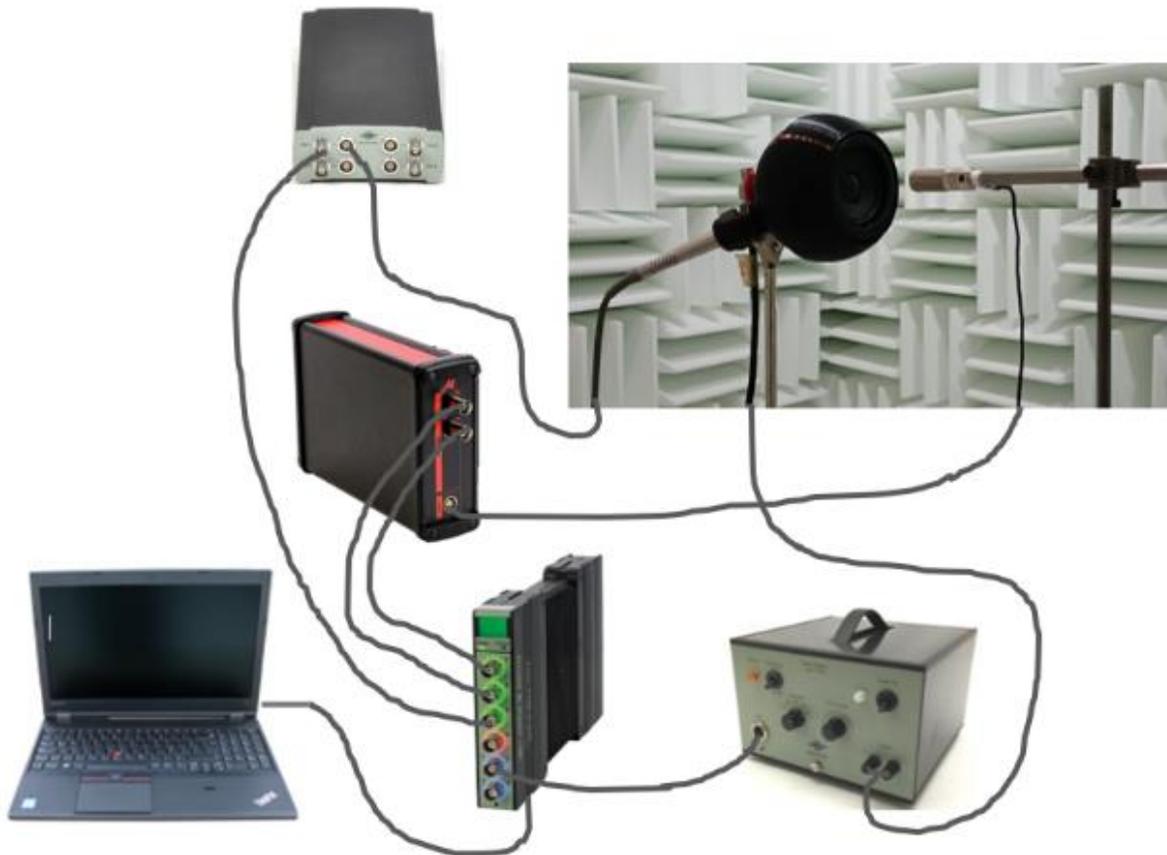


Figura 15. Instrumentación empleada en la calibración.

La configuración del Módulo de adquisición de datos Brüel & Kjær 3160-A-4/2 fue la siguiente:

Tabla 4. Configuración del módulo de adquisición Brüel & Kjær 3160-A-4/2.

Parámetro	Configuración
Tipo de medición	Auto espectro FFT
Líneas	3200
Span	12.8 kHz
df	4 Hz

Tabla 4. Configuración del módulo de adquisición Brüel & Kjær 3160-A-4/2. Continuación.

Parámetro	Configuración
Tiempo de promediación	250 ms
Promedios	718
Tiempo	60 s
Intervalo de frecuencia	0 Hz a 12.8 kHz, en pasos de 4 Hz
Tipo de promediación	Lineal
Ponderación en frecuencia	Lineal

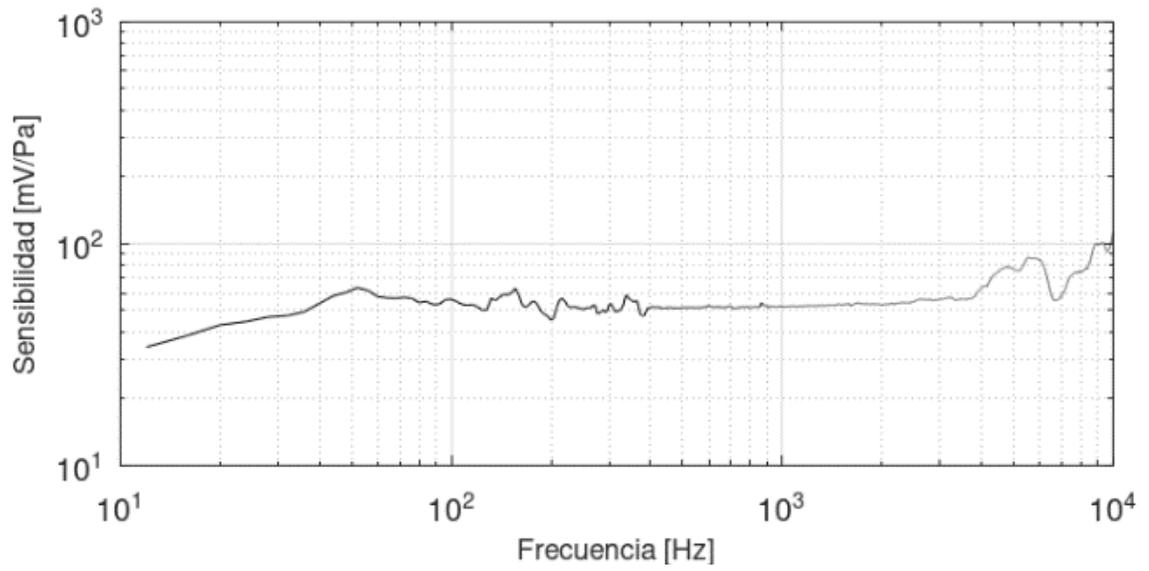
4.1.6.6. Obtención de la sensibilidad de los transductores de la sonda

A continuación, se muestran los resultados que se obtuvieron en las mediciones para el sensor de presión en dos posiciones diferentes de la sonda, además, las adecuaciones a la fuente que fue necesario realizar. Posteriormente, se muestran los resultados obtenidos en la determinación de la sensibilidad y la fase para los dos transductores de la sonda, de acuerdo con las ecuaciones descritas anteriormente.

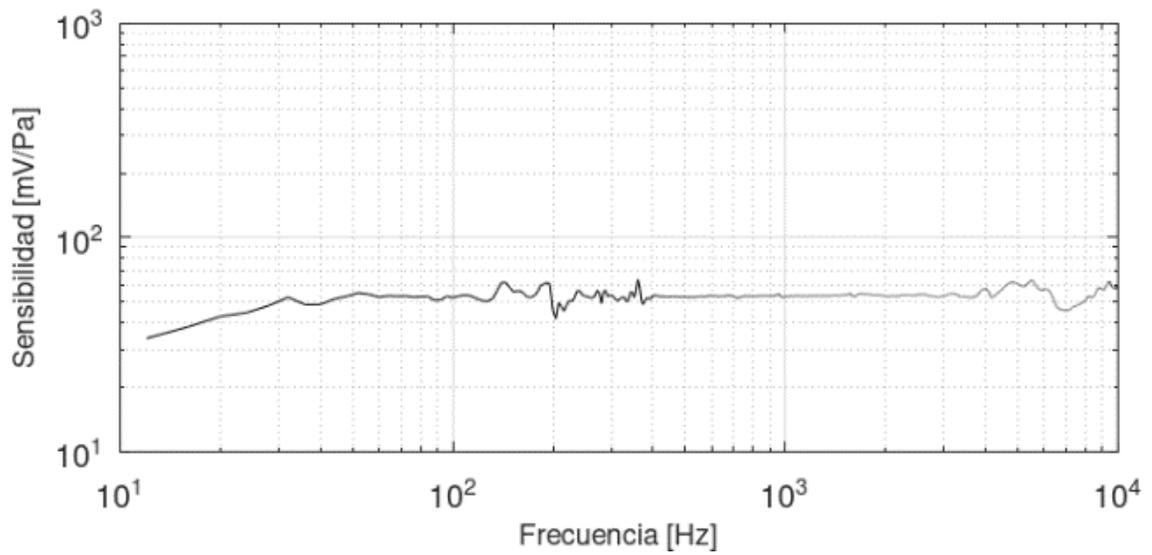
- **Sensor de presión**

Debido a que en la literatura no se indica la posición específica que debería de tener la sonda con respecto al eje de la fuente, además de que en varios trabajos se observan diferentes posiciones, en primer lugar, se hicieron pruebas en dos posiciones: en posición perpendicular respecto al eje de la fuente y en posición longitudinal, a fin de determinar la más adecuada de acuerdo con los resultados que arrojaban de cada una.

En la figura 16 se muestran los resultados para la sensibilidad del transductor de presión en diferentes posiciones, en a) se muestran los resultados con la sonda colocada en dirección perpendicular y en b) para la posición longitudinal.



a)



b)

Figura 16. Sensibilidad del transductor de presión en diferentes posiciones. a) Dirección perpendicular, b) Dirección longitudinal.

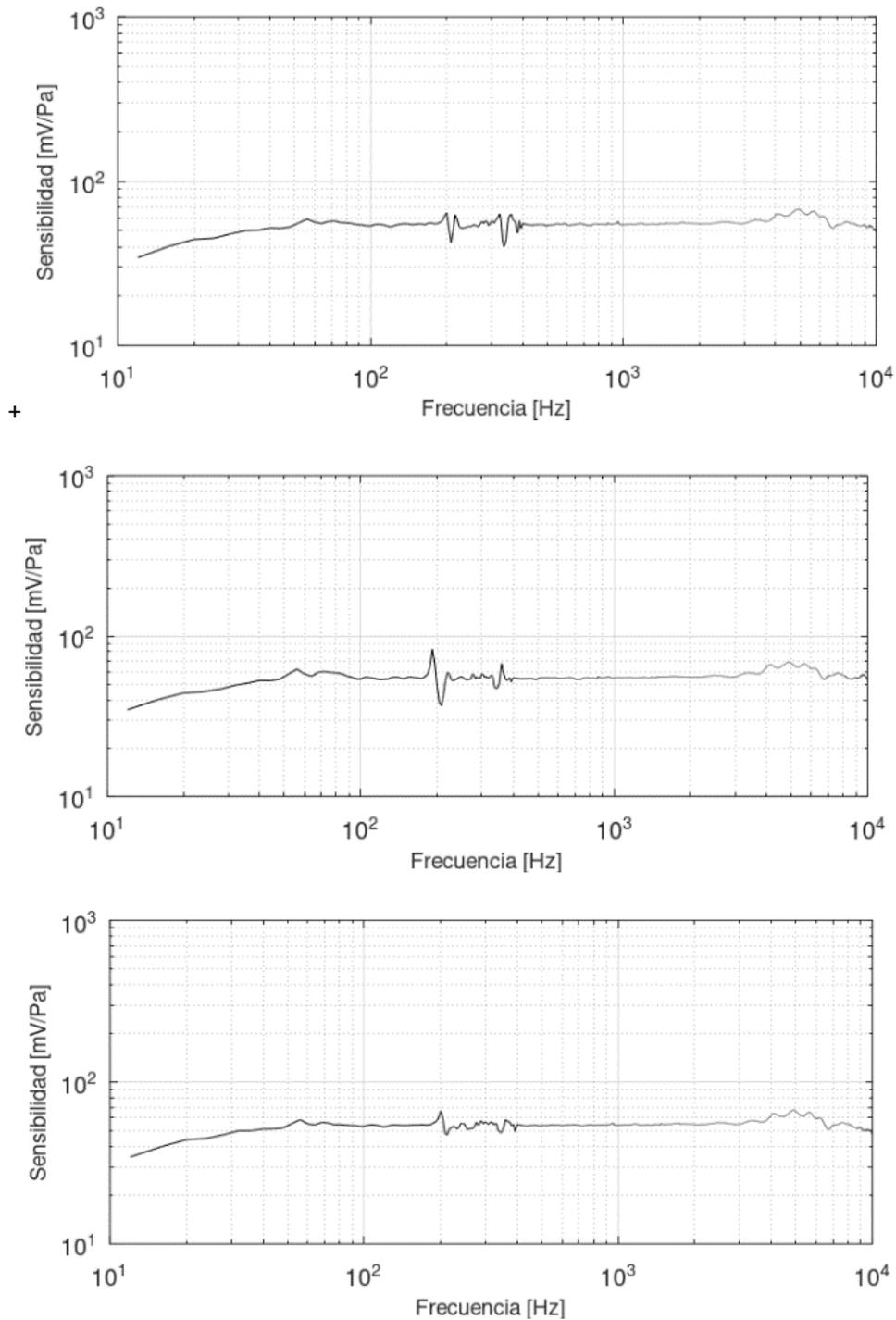


Figura 17. Curva de calibración del sensor de presión con diferentes materiales absorbentes en la fuente. Superior: material 1, medio: material 2, inferior: material 3.

Como se puede observar, la forma de la curva es muy semejante para ambas posiciones, sin embargo, al comparar estos valores de sensibilidad con los reportados en el certificado de

calibración proporcionado por el fabricante, se observó que la posición de la sonda en forma perpendicular al eje de la fuente proporciona los valores más cercanos, esto se explica por qué en esta posición el lado sensible del sensor apunta directamente hacia la fuente, por lo que se decidió realiza las mediciones en esta posición. De manera adicional, en ambas curvas aparecen discontinuidades entre las frecuencias 100 Hz y 400 Hz, así como al final de la curva a partir de 4 000 Hz. Estas discontinuidades fueron ocasionadas por reverberación dentro de la fuente, por lo cual se buscó solucionarlo agregando material acústico dentro de la esfera a fin de disminuirla. Para este fin se probaron tres diferentes materiales absorbentes, en la figura 17 se observan los resultados.

Como se observa en la figura 16, el material 3 mostró mejor acondicionamiento, por lo cual fue seleccionado para usarlo dentro de la esfera durante la calibración de la sonda. Cabe mencionar que las fuentes sonoras utilizadas en los diferentes trabajos consultados son fuentes comerciales, con un diseño y construcción de mejor calidad, mientras que la fuente utilizada en este proyecto fue desarrollada en CENAM exclusivamente para este fin.

Después de determinar la mejor posición de la sonda y el material absorbente dentro de la esfera, se procedió a realizar mediciones, en la figura 18 muestra la curva de calibración obtenida, en color negro se muestra la curva con los valores medidos y en color rojo la curva con ajuste, para este caso se utilizó un ajuste polinomial. Los resultados obtenidos mostraron también que, para las frecuencias más bajas, esto es de 10 a 50 Hz, no se obtuvieron los resultados esperados, lo cual se debió a la calidad de la fuente utilizada, así como a su intervalo de trabajo, por lo que se decidió tomar como válidos los valores a partir de la frecuencia de 60 Hz.

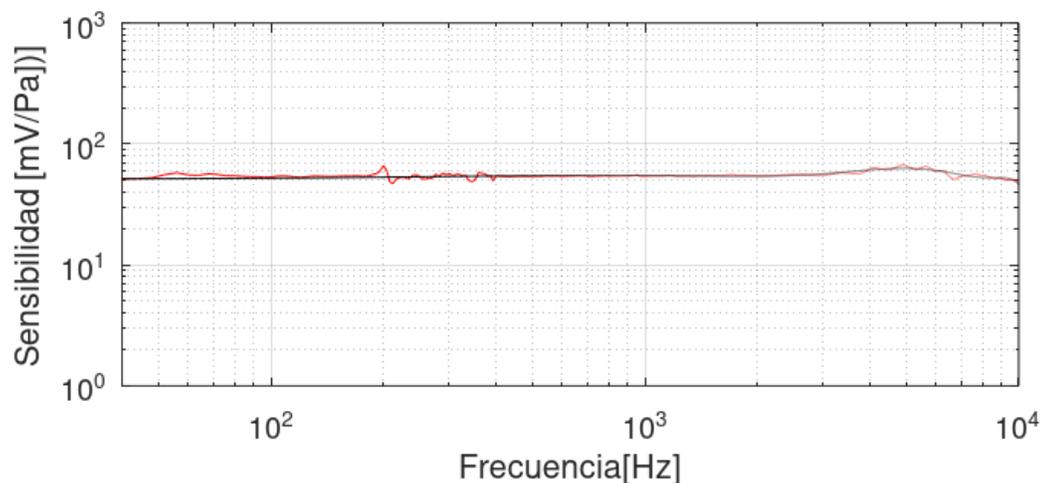


Figura 18. Curva de calibración para el sensor de presión con ajuste.

La figura 19 muestra también que a partir de 6 000 Hz la curva comienza a bajar, un comportamiento esperado de acuerdo a la literatura (de Bree, 2009), por lo que se ajustó la tendencia de la curva para estas frecuencias, el resultado se muestra en la figura siguiente.

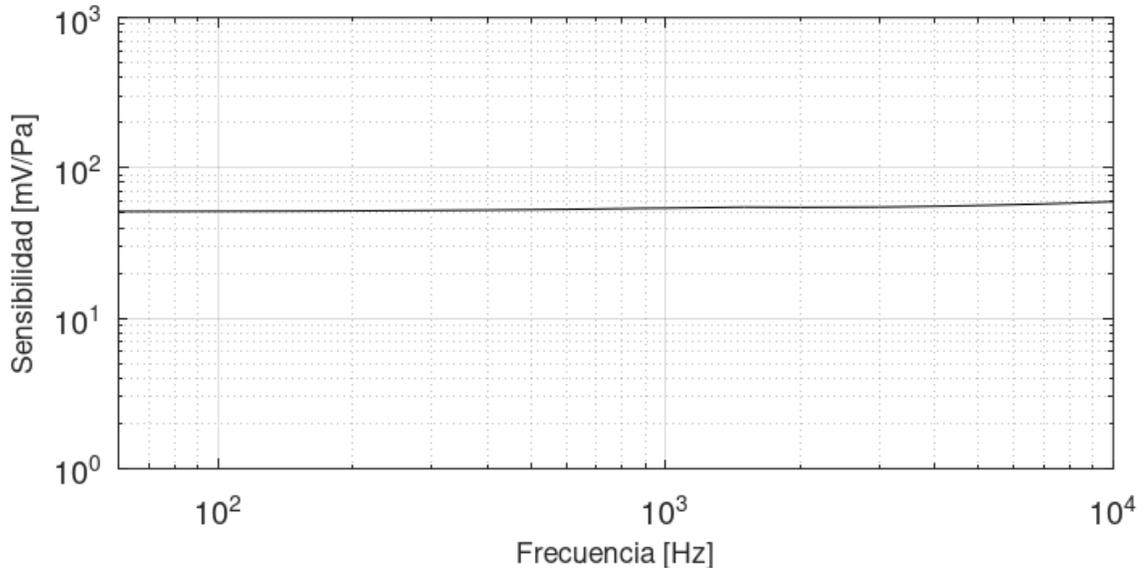


Figura 19. Curva de calibración para el sensor de presión.

La curva de calibración obtenida después del procesamiento anterior, así como los valores de sensibilidad obtenidos se muestran en la figura 20 y tabla 5 respectivamente, en la tabla se muestran también los valores de sensibilidad reportados por el fabricante en el certificado de fábrica.

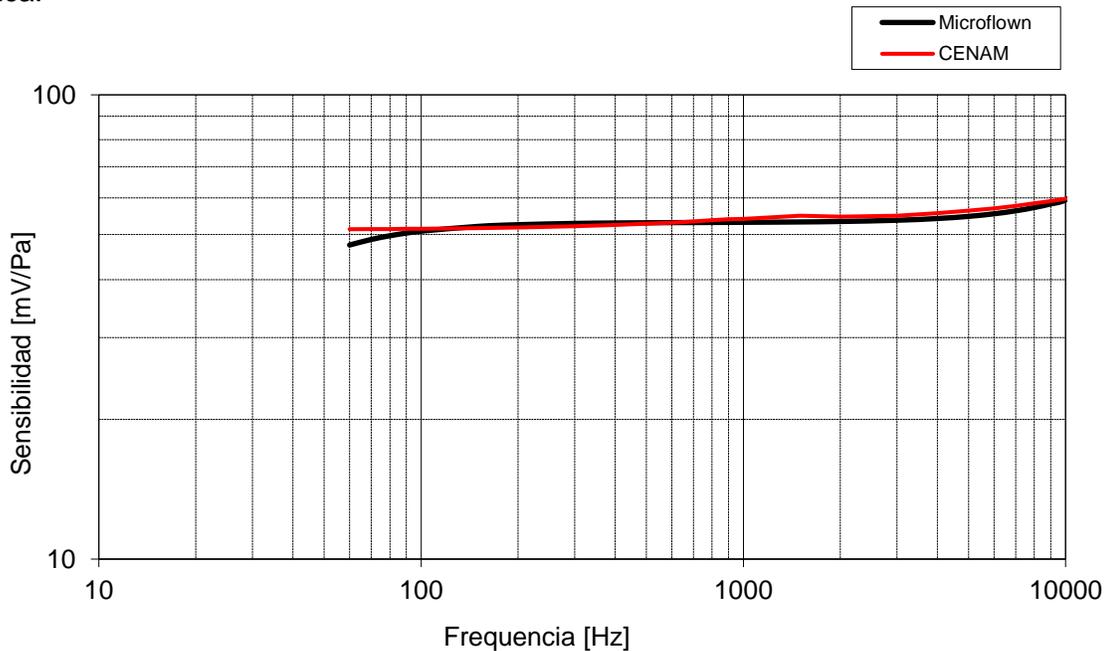


Figura 20. Curva de calibración sensor de presión obtenida y la reportada por el fabricante.

Tabla 5. Sensibilidad del sensor de presión, obtenida y la reportada por el fabricante.

F, [Hz]	S, [mV/Pa]	
	Microflown	CENAM
60	47.49	51.35
70	48.80	51.38
80	49.72	51.42
90	50.37	51.45
100	50.86	51.48
150	52.07	51.65
200	52.51	51.81
300	52.84	52.14
400	52.96	52.45
500	53.02	52.77
600	53.06	53.07
700	53.08	53.37
800	53.10	53.67

F, [Hz]	S, [mV/Pa]	
	Microflown	CENAM
900	53.12	53.95
1 000	53.14	54.06
1 500	53.24	54.86
2 000	53.36	54.67
3 000	53.69	54.90
4 000	54.15	55.59
5 000	54.73	56.28
6 000	55.44	56.97
7 000	56.26	57.66
8 000	57.19	58.35
9 000	58.23	59.05
10 000	59.37	59.74

Como se puede observar, los valores obtenidos son bastante cercanos a los reportados por el fabricante, a excepción de la frecuencia de 60 Hz, donde se observa una diferencia cercana a los 4 mV/Pa, sin embargo, se considera aceptable. Por lo anterior, se puede afirmar que la calibración fue realizada de manera adecuada.

- **Sensor de velocidad**

De acuerdo con lo mencionado, la calibración de este sensor se compone de dos pasos, uno para las bajas frecuencias en donde el micrófono de referencia se coloca dentro de la esfera y la sonda a una corta distancia de ésta (4.0 cm) y el otro para las medias y altas frecuencias con el micrófono de referencia y la sonda a una distancia mayor (22 cm).

- **Resultados para bajas frecuencias**

La figura 21 muestra el resultado para las bajas frecuencias.

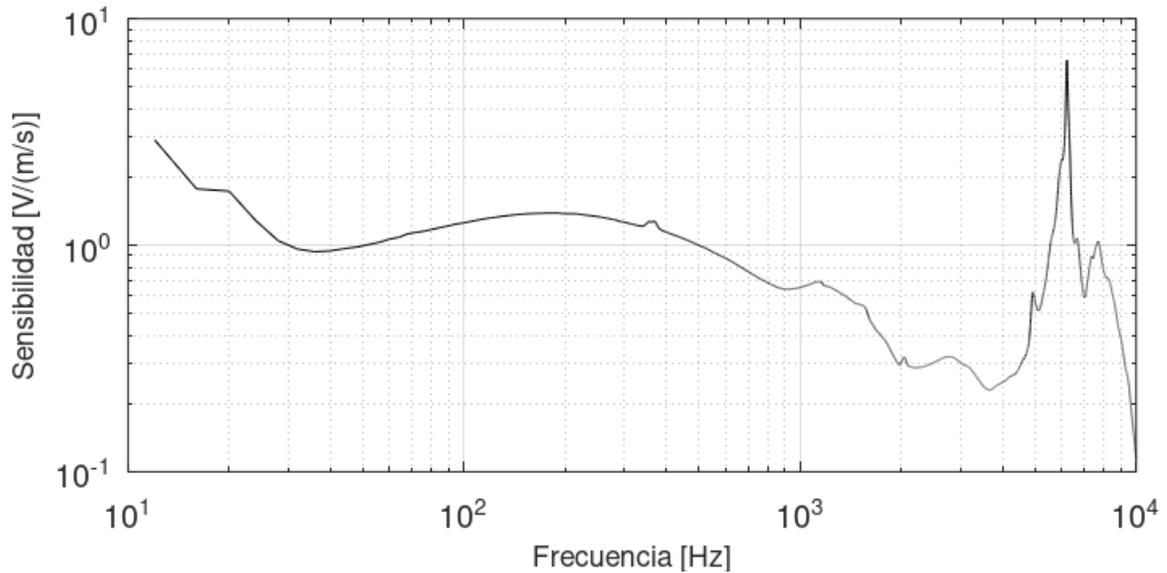


Figura 21. Curva de calibración para el sensor de velocidad bajas frecuencias.

Como se observa en la figura, se obtiene resultados válidos hasta la frecuencia de 1 000 Hz, como se menciona en la literatura, a partir de esta frecuencia el método no funciona adecuadamente debido a que la presión sonora en la esfera no es homogénea y a las ondas estacionarias dentro de ésta (de Bree, 2009). De igual manera, Basten (2009) menciona que, si la longitud de onda medida es menor que las dimensiones de la esfera, la presión sonora no es uniforme dentro de ésta y la relación dada por la ecuación (54) ya no es válida, lo cual queda validado con la medición realizada. También, se muestra que en el intervalo de 10 Hz a 40 Hz aproximadamente la curva presenta una desviación importante respecto a los valores esperados, es el mismo comportamiento que se obtuvo para el sensor de presión, comportamiento atribuible también a las características de la fuente, se vuelve a demostrar que no trabaja adecuadamente por debajo de 40 Hz.

- Resultados para medias y altas frecuencias

En la figura 22 muestra el resultado para las medias y altas frecuencias.

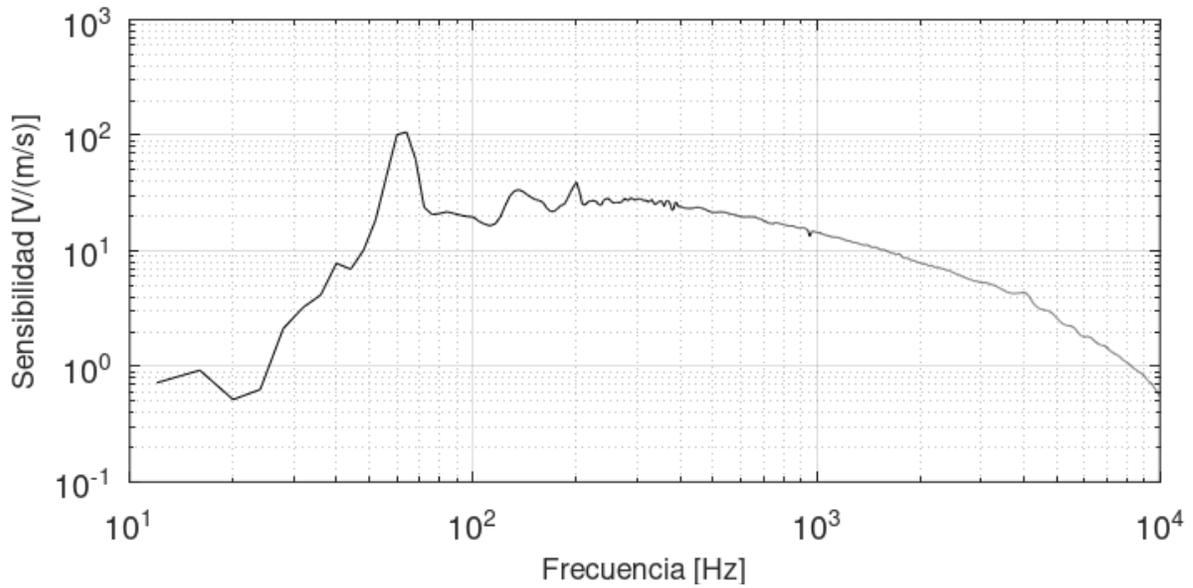


Figura 22. Curva de calibración para el sensor de velocidad para altas frecuencias.

De nueva cuenta, en esta medición se observa un intervalo en frecuencia en el que el método funciona correctamente, en este caso es a partir de aproximadamente 200 Hz hasta 10 000 Hz. Aunque Basten menciona que en una cámara anecoica el método funciona desde 50 Hz, es el ruido de fondo el que determinará el intervalo de calibración, que puede ser de varios cientos de Hertz hasta aproximadamente 10 kHz. En el caso de la cámara anecoica de CENAM, el ruido de fondo para frecuencias bajas está alrededor de 50 dB en ponderación lineal, comparados con niveles de hasta 15 dB a 20 dB que fueron medidos durante la calibración, explica el porqué de los resultados en estas frecuencias.

La figura siguiente muestra los resultados para ambas calibraciones, se muestran solo los intervalos útiles obtenidos, al igual que para el sensor de presión, ambas curvas fueron ajustadas, las líneas negras muestran los valores medidos y la línea roja los valores con ajuste polinomial.

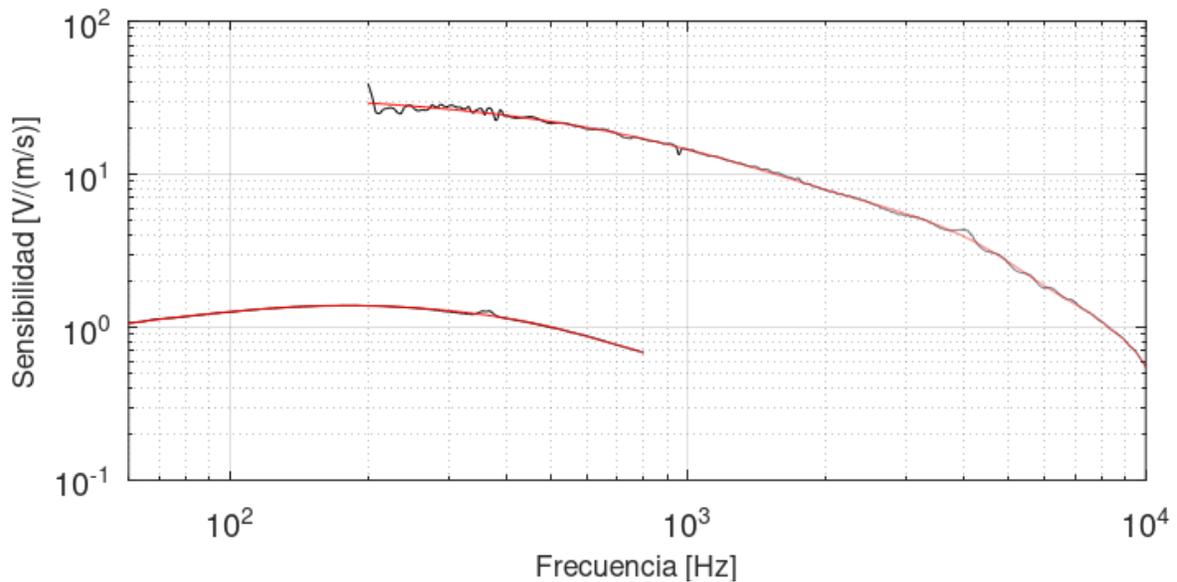


Figura 23. Curvas de calibración para el sensor de velocidad para bajas y altas frecuencias.

Como se puede ver en la figura 23, ambas curvas presentan una forma similar, aunque se encuentran separadas, de acuerdo con de Bree (2009), esto se debe a que en la ecuación (54) se utiliza la velocidad normal absoluta del pistón u_n [m/s] en lugar de la velocidad normalizada u [Pa*] además de que existen algunos parámetros que no se conocen con exactitud, como por ejemplo el volumen interior de la esfera y la superficie móvil del pistón, por lo tanto la relación no se conoce en términos absolutos, por lo que al no conocer los valores escalares exactos se produce un error en amplitud constante a lo largo del intervalo de frecuencias. Esto se resuelve desplazando la curva en dirección vertical hasta que coincida con la curva de calibración de alta frecuencia.

Con el argumento del párrafo anterior, se realizó el desplazamiento de la curva, para ello, de acuerdo a los resultados obtenidos y a lo que se comentó en la teoría de la calibración, hay un intervalo de frecuencias en el que ambas mediciones son válidas, así, para realizar el desplazamiento de la curva de bajas frecuencias se eligieron las mediciones de las frecuencias de 250 Hz a 350 Hz, posteriormente se promediaron los valores de cada curva en este intervalo y se obtuvo su diferencia, posteriormente se sumó este valor obtenido a los valores de la curva de bajas frecuencias para obtener los nuevos valores de la curva desplazada, el resultado se puede ver en la figura 24, donde se muestran las curvas ajustadas.

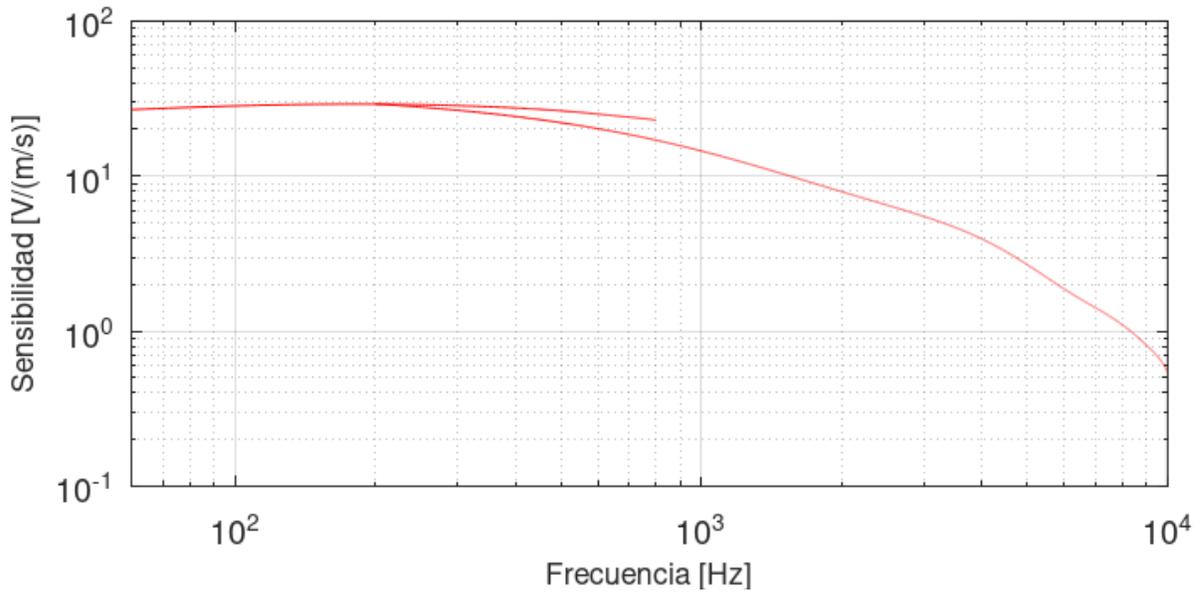


Figura 24. Unión de curvas de calibración para el sensor de velocidad bajas y altas frecuencias.

El último paso en la calibración es unir ambas curvas, para ello se forman tres intervalos de frecuencias, el primero corresponde a los valores de la curva de bajas frecuencias en el intervalo de 60 Hz a 249 Hz, el segundo es el intervalo de transición que corresponde a las frecuencias de 250 Hz a 350 Hz en este se promedian los valores de ambas curvas en cada frecuencia, el último intervalo es para los valores de la curva de medias y altas frecuencias a partir de la frecuencia de 351 Hz hasta 10 000 Hz, de esta manera se unen las curvas y se tiene el intervalo completo, el resultado se muestra en la figura 25.

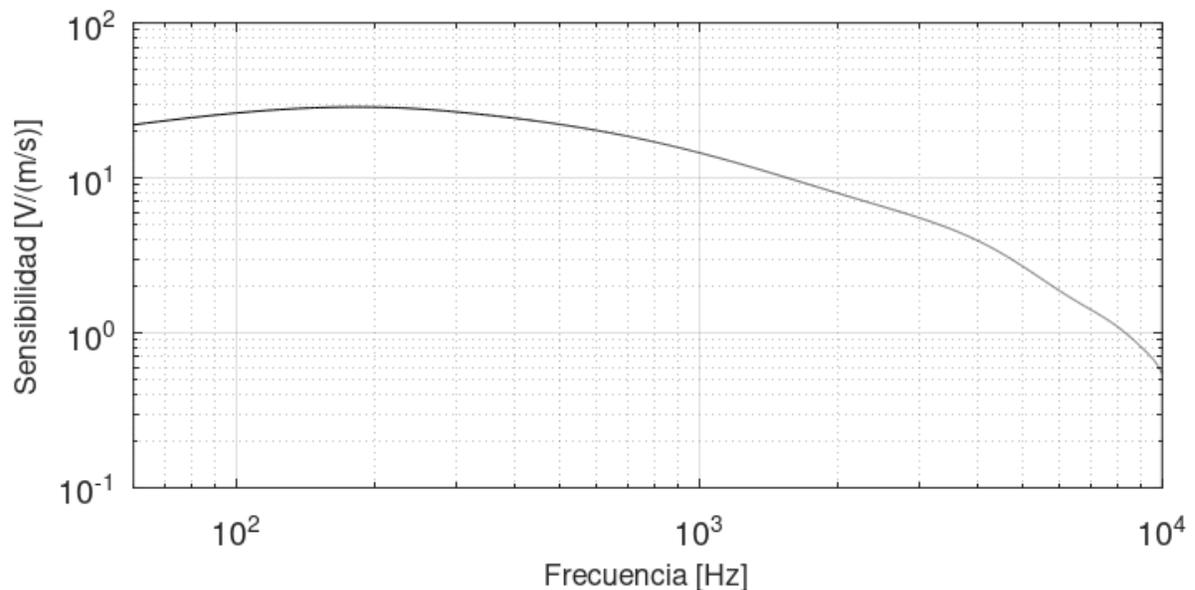


Figura 25. Curva de calibración para el sensor de velocidad intervalo completo.

La curva de calibración y los valores de sensibilidad obtenidos con el procesamiento anterior se muestran en la tabla 6 y figura 26, en la tabla se muestran también los valores de sensibilidad reportados por el fabricante en el certificado de fábrica.

Tabla 6. Sensibilidad del sensor de velocidad, obtenida y la reportada por el fabricante.

F, [Hz]	S, [V/(m/s)]	
	Microflown	CENAM
60	20.64	22.05
70	22.20	23.36
80	23.40	24.49
90	24.34	25.44
100	25.06	26.24
150	26.79	28.42
200	27.01	28.63
300	25.91	26.63
400	24.10	24.25
500	22.14	22.13
600	20.24	20.25
700	18.50	18.56
800	16.94	17.06

F, [Hz]	S, [V/(m/s)]	
	Microflown	CENAM
900	15.55	15.72
1 000	14.33	14.54
1 500	9.97	10.31
2 000	7.41	7.94
3 000	4.59	5.50
4 000	3.11	3.93
5 000	2.24	2.68
6 000	1.67	1.87
7 000	1.29	1.42
8 000	1.03	1.10
9 000	0.83	0.81
10 000	0.69	0.54

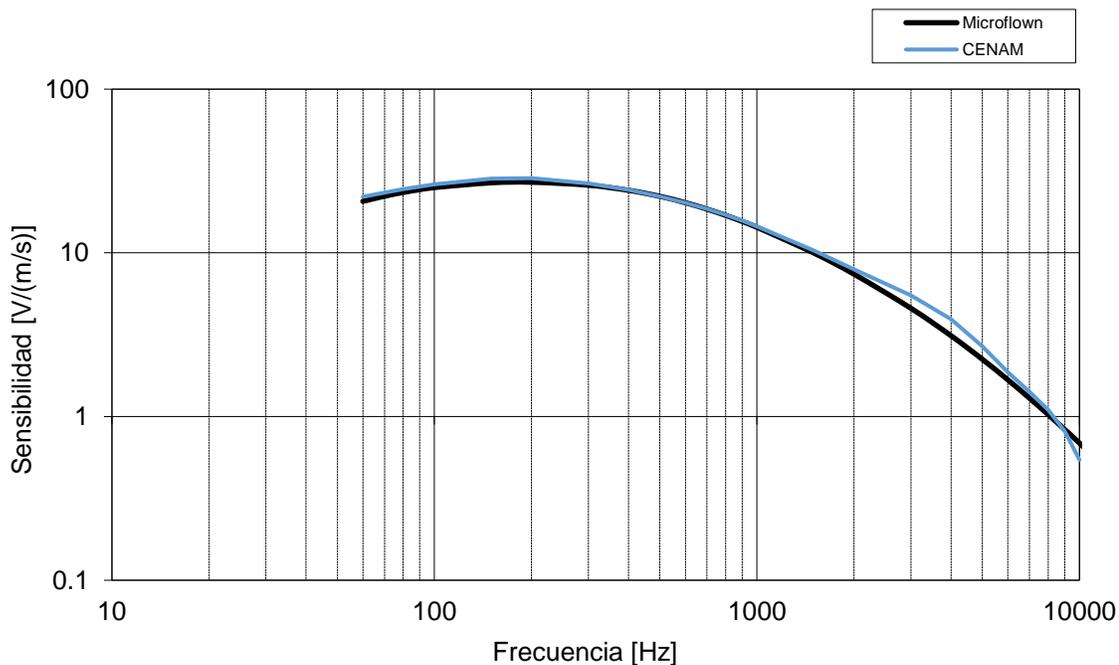


Figura 26. Curva de calibración para la sensibilidad del sensor de velocidad, obtenida y la reportada por el fabricante.

Al igual que para el sensor de presión, para este sensor los valores obtenidos se encuentran cercanos a los reportados por el fabricante, las diferencias se pueden deber a errores de medición. Por lo anterior, se puede afirmar que la calibración se realizó adecuadamente.

Cabe mencionar que para realizar el procesamiento de las mediciones se desarrolló un programa en GNU Octave. El programa realiza los cálculos de las sensibilidades, el ajuste de las curvas, el desplazamiento de la curva de bajas frecuencias y su unión con la curva de altas frecuencias.

4.1.6.7. Obtención de la fase de los transductores de la sonda

Ninguna de las referencias consultadas indica cómo se obtiene la fase de los transductores por lo que se decidió utilizar el modelo que recomienda el fabricante para calcularla, se utilizó la ecuación (58) para el sensor de presión y la ecuación (60) para el sensor de velocidad. En ambas ecuaciones se utilizaron las sensibilidades obtenidas en la calibración realizada.

De esta manera, las fases calculadas se muestran en la tabla 7 y 8, figuras 27 y 28.

Tabla 7. Fase del sensor de presión, obtenida y la reportada por el fabricante.

F, [Hz]	Fase, [Grados]	
	Microflown	CENAM
10	69.17	69.17
15	56.97	56.97
20	47.90	47.90
30	35.66	35.66
40	28.08	28.08
50	23.05	23.05
60	19.51	19.51
70	16.90	16.90
80	14.91	14.91
90	13.35	13.35
100	12.08	12.08
150	8.28	8.28
200	6.40	6.40
300	4.61	4.61
400	3.81	3.81
500	3.41	3.41

F, [Hz]	Fase, [Grados]	
	Microflown	CENAM
600	3.21	3.21
700	3.13	3.13
800	3.11	3.11
900	3.15	3.15
1000	3.22	3.22
1500	3.82	3.82
2000	4.62	4.62
3000	6.42	6.42
4000	8.31	8.31
5000	10.21	10.21
6000	12.11	12.11
7000	14.00	14.00
8000	15.86	15.86
9000	17.69	17.69
10000	19.49	19.49
20000	35.18	35.18

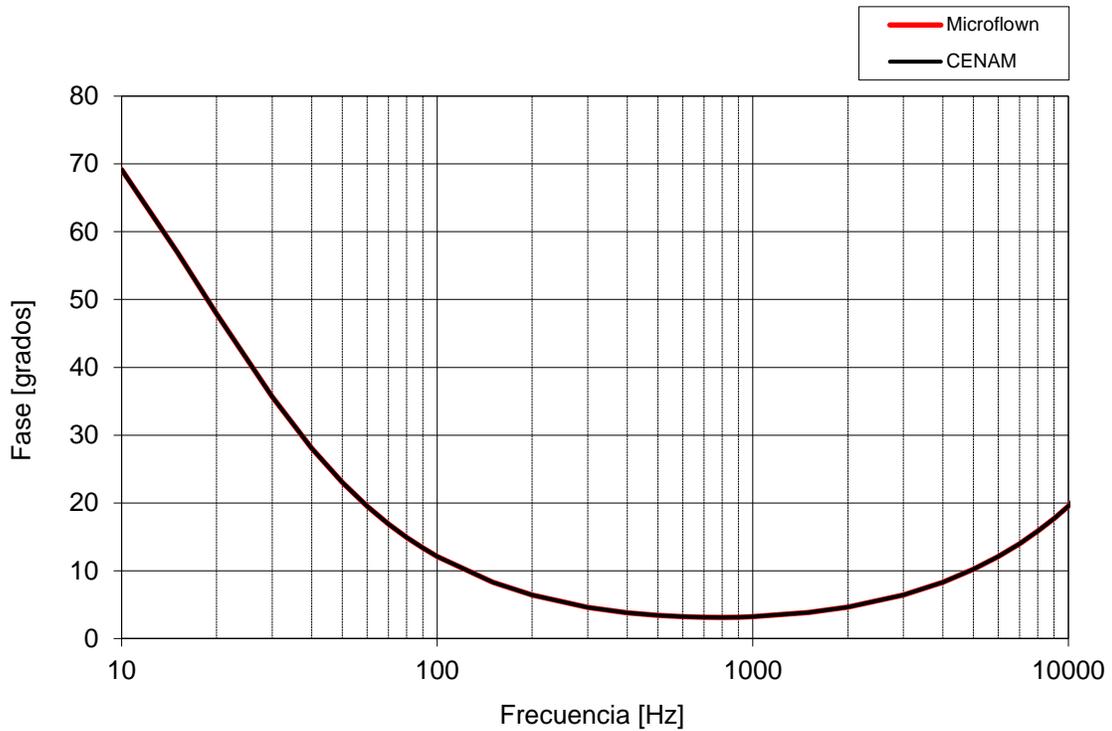


Figura 27. Modelo para la fase del sensor de presión, obtenida y la reportada por el fabricante.

Tabla 8. Fase del sensor de velocidad, obtenida y la reportada por el fabricante.

F, [Hz]	Fase, [Grados]	
	Microflow	CENAM
10	85.36	85.36
15	78.43	78.43
20	72.60	72.60
30	62.47	62.47
40	53.72	53.72
50	46.10	46.10
60	39.43	39.43
70	33.58	33.58
80	28.42	28.42
90	23.83	23.83
100	19.71	19.71
150	3.91	3.91
200	-7.28	-7.28
300	-23.28	-23.28
400	-34.72	-34.72
500	-43.44	-43.44

F, [Hz]	Fase, [Grados]	
	Microflow	CENAM
600	-50.31	-50.31
700	-55.85	-55.85
800	-60.42	-60.42
900	-64.27	-64.27
1000	-67.55	-67.55
1500	-78.99	-78.99
2000	-86.27	-86.27
3000	-96.19	-96.19
4000	-103.52	-103.52
5000	-109.59	-109.59
6000	-114.84	-114.84
7000	-119.49	-119.49
8000	-123.63	-123.63
9000	-127.33	-127.33
10000	-130.66	-130.66
20000	-150.83	-150.83

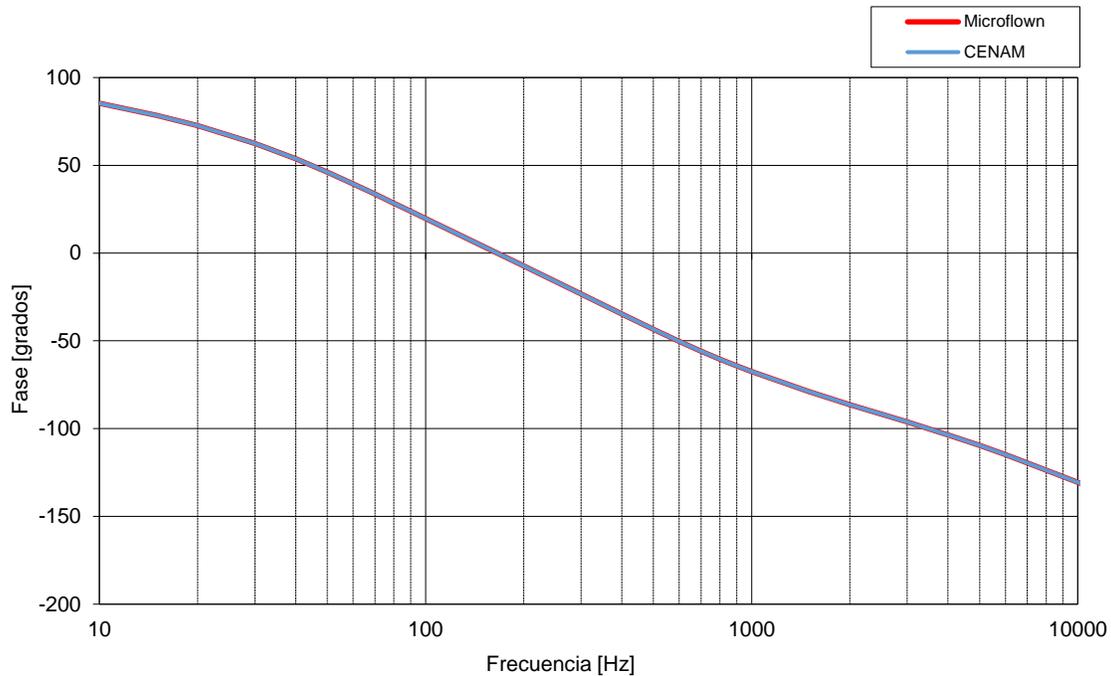


Figura 28. Modelo para la fase del sensor de velocidad, obtenida y la reportada por el fabricante.

Es claro que los valores obtenidos y los reportados por el fabricante son prácticamente los mismos, dado que se utilizó el modelo sugerido por Microflown, aunque los valores de sensibilidad utilizados son ligeramente diferentes, las fases son las mismas.

4.2. Desarrollo del método de medición de intensidad acústica con sonda “p-u”

4.2.1. Antecedentes

El método de medición tradicional de intensidad acústica, que utiliza una sonda de intensidad del tipo “p-p”, se encuentra regulado por una serie de normas internacionales ISO, estas son: ISO 9614-1, ISO 9614-2 y ISO 9614-3. En este tipo de sonda la presión sonora se ve afectada por las condiciones de medición en campos acústicos que presentan reverberación o un considerable ruido de fondo, afectando de esta manera la exactitud de la estimación de la intensidad (Fernández et al., 2014). A fin de garantizar la validez de las mediciones, estas normas definen una serie de parámetros conocidos como indicadores de campo, los cuales se calculan con los datos obtenidos, las características de los instrumentos de medición empleados y las condiciones del entorno de prueba.

Fernández et al., 2014, demostraron que es viable ampliar el método de medición normalizado para utilizarlo en sondas de intensidad tipo “p-u”, introduciendo un nuevo indicador de campo que tiene en cuenta el error de medición de este tipo de sonda. Demostraron que se obtienen resultados similares para ambos métodos en dos entornos acústicos diferentes, esto es, una cámara anecoica y un entorno con ruido de fondo.

Por lo anterior, el método de medición que se propone está basado en la norma internacional ISO 9614-1, medición en puntos discretos, con las modificaciones sugeridas por Fernández et al., 2014, las diferencias radican en que no se calculan varios parámetros utilizados en la sonda “p-p”, dado el principio de medición, y se calcula un nuevo indicador de campo.

4.2.2. Introducción

La norma ISO 9614-1 describe un método para medir la componente de la intensidad sonora normal a una superficie de medición, esta superficie es elegida de forma que encierre a la fuente a la cual se desea determinar el nivel de potencia sonora, la superficie es dividida en varias superficies parciales en las que se colocará la sonda de intensidad. A partir de los valores medidos se calcula el nivel de potencia sonora parcial y posteriormente el nivel de potencia sonora total, que será la potencia sonora radiada por todas las fuentes situadas dentro de la superficie excluyendo el sonido radiado por las fuentes situadas fuera de la superficie.

4.2.3. Alcance

El método de medición puede ser utilizado en los siguientes casos:

- Cualquier fuente para la cual se puede definir una superficie de medición, no hay restricciones en cuanto a su tamaño.
- Fuentes sonoras de ruido estacionario en el tiempo.
- Es aplicable en entornos de prueba específicos.

4.2.4. Incertidumbre de medición

Conforme a la norma, la incertidumbre en la determinación de la potencia acústica va a depender del grado de exactitud que se desee obtener en su determinación, la norma define tres grados, para cada uno indica la desviación estándar que se obtiene para diferentes intervalos de frecuencia, estos valores se muestran en la Tabla 9 de la norma, la cual se muestra a continuación.

Tabla 9. Incertidumbre en la determinación de niveles de potencia acústica

Frecuencias centrales en bandas de octava Hz	Frecuencias centrales en bandas de tercios de octava Hz	Desviaciones estándar, s ¹⁾		
		Precisión (grado 1) dB	Ingeniería (grado 2) dB	Inspección (grado 3) dB
63 a 125	50 a 160	2	3	
250 a 500	200 a 630	1.5	2	
1 000 a 4 000	800 a 5 000	1	1.5	
	6 300	2	2.5	
Ponderado en A ²⁾				4 ³⁾

¹⁾ El valor real del nivel de potencia acústica debe esperarse con una probabilidad del 95 % en el intervalo de $\pm 2s$ respecto al valor medido.

²⁾ 63 Hz a 4 kHz o 50 Hz a 6.3 kHz.

³⁾ Dada la gran variedad de equipos a los que se pueden aplicar las normas, el valor indicado es sólo provisional.

Dentro de las fuentes principales de incertidumbre se encuentran las siguientes:

- a) La naturaleza del campo acústico de la fuente
- b) La naturaleza de campo acústicos extraños
- c) La absorción de la fuente bajo prueba
- d) El tipo de muestreo del campo de intensidad
- e) El procedimiento de medición empleado

4.2.5. Condiciones ambientales y entorno de medición

A fin de realizar mediciones confiables es necesario considerar los siguientes aspectos:

- No hacer mediciones si la velocidad del aire media excede 1.5 m/s.
- Usar una pantalla de viento durante mediciones al aire libre.
- Realizar el montaje de la sonda de tal forma que no esté sujeta a vibración.
- La sonda no deberá ser ubicada a menos de 20 mm de cuerpos que tengan una temperatura significativamente diferente a la ambiental. Evitar el uso de la sonda en temperaturas más altas que la ambiente.
- Deberá asegurarse que el operador no esté parado sobre o próximo al eje de la sonda.

Para la correcta aplicación del método es importante remover cualquier material absorbente que se encuentre en el interior de la superficie de medición, de lo contrario puede existir una estimación errónea de la potencia acústica debido a los altos niveles de intensidad extraña.

4.2.6. Equipos utilizados

Los instrumentos de medición empleados se muestran en la tabla 10 y figura 29.

Tabla 10. Instrumentos empleados en la medición de intensidad acústica.

Instrumento	Marca	Modelo
Sonda de intensidad	Microflown	PU Mini
Acondicionador de señal	Microflown	MFPA2
Módulo de adquisición	Brüel & Kjær	LAN-XI 3160-A-4/2
Software de adquisición de las señales	Brüel & Kjær	Pulse LabShop
Computadora	-	-

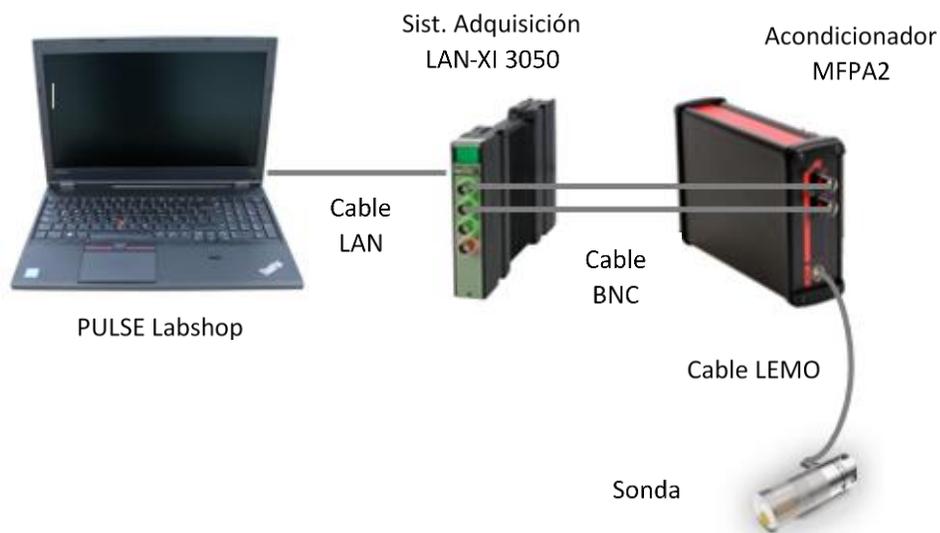


Figura 29. Sistema de medición de intensidad acústica.

La configuración del módulo de adquisición LAN-XI 3160-A-4/2 es la siguiente:

Tabla 11. Configuración módulo de adquisición.

Parámetro	Configuración
Analizador	CPB
Ancho de banda	1/3 de octava
Tipo de medición	Auto espectro
Intervalo de frecuencia	100 Hz a 10 000 Hz
Tipo de promediación	Lineal
Tiempo de promediación	12 s
Ancho de banda	1/3 de octava
Ponderación en frecuencia	L
Sensibilidad de los sensores	1 mV/Pa
Unidades de la amplitud	dB re 20 μ Pa

El software LabShop se configura para registrar los siguientes parámetros:

- Amplitud del espectro en frecuencia del sensor de presión p , dB re 20 μ Pa
- Amplitud del espectro en frecuencia del sensor de velocidad u , dB re 20 μ Pa
- Amplitud del espectro cruzado, dB re 20 μ Pa
- La fase del espectro cruzado de los sensores p y u en grados

De manera adicional, LabShop permite la configuración de los diferentes parámetros de medición como son las condiciones ambientales y la sensibilidad de los transductores.

La plataforma de medición Pulse LabShop utiliza su propio formato de datos, sin embargo, permite también utilizar otros más, en este caso, para fines de procesamiento, se configura para guardar los datos en un archivo de Excel.

4.2.7. Indicadores de campo

Los indicadores de campo evalúan las condiciones de medición y determinan la calidad de los resultados obtenidos. Con los indicadores de campo se puede obtener información útil, por medio de la sonda, sobre la naturaleza de un campo sonoro.

La norma utiliza cuatro indicadores, F_1 , F_2 , F_3 y F_4 , sin embargo, para la sonda tipo “p-u”, Fernández et. al., 2014 reemplazan los indicadores F_2 y F_3 por un nuevo indicador, el indicador de error de reactividad, F_5 . Así, para esta sonda se aplicarán solo los indicadores de campo F_1 , F_4 y F_5 . A continuación, se describen cada uno de ellos:

- Indicador de variabilidad temporal del campo acústico, F_1

Este indicador se utiliza para comprobar la estacionalidad del campo sonoro dentro de un segmento de la superficie de medición, se realiza mediante la evaluación de una serie de estimaciones de intensidad promedio en un corto tiempo, está dada por:

$$F_1 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (I_{nk} - I_n)^2} \quad (63)$$

donde I_n es el valor medio de I_n para M mediciones de intensidad acústica normal a la superficie para un punto discreto seleccionado, se recomiendan un valor de M de 10. Las mediciones son promediadas en el corto tiempo I_{nk} , calculado con la siguiente ecuación:

$$I_n = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M I_{nk} \quad (64)$$

Se recomienda un tiempo de promediación corto entre 8 y 12 segundos, o cualquier número entero de ciclos para señales periódicas.

El criterio para este indicador es de $F_1 \leq 0.6$.

- Indicador de no uniformidad del campo, F_4

Este indicador se utiliza para controlar el número mínimo de segmentos necesarios para realizar la medición, es básicamente la relación entre la desviación estándar de la muestra y la media de las mediciones de intensidad sonora sobre la superficie de medición. Está definido por:

$$F_4 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_{ni} - I_n)^2} \quad (65)$$

donde I_n es intensidad sonora normal a la superficie calculada con la ecuación:

$$I_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{ni} \quad (66)$$

El criterio para este indicador se da como $N > CF_4^2$, donde "N" es el número de puntos de medición y "C" es una constante que está en función de la frecuencia y el grado de exactitud deseado, ver tabla 4 proporcionada por la norma. Este criterio básicamente lo que define es la adecuación del entorno de prueba, es decir, refleja si el número N de segmentos elegidos se considera suficiente.

- Indicador de error de reactividad, F_5

Este indicador reemplaza a los indicadores F_2 y F_3 indicados en la norma para la sonda de intensidad tipo "p-p", es utilizado para controlar los errores de sesgo introducidos por el uso de sondas tipo "p-u". El indicador está directamente asociado a la relación de fase entre presión y velocidad, y corresponde a la relación entre la intensidad reactiva y la activa en forma logarítmica, Fernández et al., 2014, Está definido como:

$$F_5 = \left| 10 \log \left(1 - \varphi_{ue} \frac{|J_n|}{|I_n|} \right) \right| \quad (67)$$

φ_{ue} es aproximadamente 0.035 radianes (2°), cuando se calibra la sonda con el procedimiento de pistón sobre la esfera.

El criterio para F_5 es $F_5 < 2s$ donde s es la desviación estándar definida en términos de bandas de octava y para el grado de exactitud de precisión, de acuerdo a la norma ISO 9614-1, ver tabla 9.

Tabla 12. Valores del factor C

Frecuencias centrales bandas de octava Hz	Frecuencias centrales bandas de tercios de octava Hz	C		
		Precisión (grado 1)	Ingeniería (grado 2)	Inspección (grade 3)
63 a 125	50 a 160	19	11	8
250 a 500	200 a 630	29	19	
1 000 a 4 000	800 a 5 000	57	29	
Ponderado en A ¹⁾	6 300	19	14	
1) 63 Hz a 4 kHz o 50 Hz a 6.3 k Hz				

4.2.8. Medición

El proceso de medición se describe a continuación.

4.2.8.1. Preparación de la fuente y superficie de medición

- Colocar la fuente en la forma de su uso normal. En caso de que exista algún protocolo de prueba colocarla como lo especifique, de igual manera, seleccionar el funcionamiento y montaje indicado. En caso de no existir protocolo, la fuente deberá de operar con carga elevada en una condición estable.
- Definir la superficie de medición la cual deberá tener preferentemente forma de paralelepípedo, hemisferio, cilindro y semicilindro.
- La distancia promedio entre la superficie de medición y la superficie de la fuente bajo prueba deberá ser mayor de 0.5 m.
- Definir la cantidad de segmentos en que se dividirá la superficie, como mínimo se sugiere 1 posición por m², y un mínimo de 10 posiciones distribuidas en la superficie de medición lo más uniformemente posible. En los casos en los que el ruido ajeno a la fuente sea considerable de forma tal que pueda requerir de más de 50 posiciones de medición, es

posible seleccionar 1 posición por cada 2 m². En casos donde este ruido sea insignificante, y para superficies de medición mayores de 50 m², distribuir 50 posiciones uniformemente en toda la superficie de medición.

4.2.8.2. Mediciones

Las mediciones se realizan en dos etapas:

- Etapa 1 Mediciones preliminares

Consiste en realizar mediciones del nivel de intensidad sonora en uno o varios puntos característicos de la superficie de medición, a fin de estimar la variabilidad temporal del campo sonoro. El objetivo es encontrar un tiempo de medición para el cual el nivel de ruido de la fuente es estacionario, este tiempo se usará en las mediciones posteriores lo que permitirá garantizar la exactitud de los resultados. Con estas mediciones se calculará el indicador de campo F_1 .

- Etapa 2 Mediciones para determinar la potencia sonora

En esta etapa se realizan mediciones de los niveles de intensidad sonora y de los niveles de presión sonora en cada uno de los puntos de la superficie de medición definidos, con estas mediciones se calcularán los niveles de potencia sonora y los indicadores de campo F_4 y F_5 .

Procedimiento Etapa 1

1. Preparar el sistema de medición de acuerdo con la figura X.
2. Iniciar el software LabShop y seleccionar el proyecto de medición realizado para este fin.
3. Asegurarse que el ruido de fondo, medido en diferentes puntos distribuidos uniformemente sobre la superficie de medición, esté al menos 10 dB en ponderación A por debajo del nivel generado por la fuente de prueba, a fin de que no tenga influencia sobre las mediciones
4. Elegir una posición de medición típica sobre la superficie de medición y realizar N mediciones sucesivas. Iniciar con un tiempo relativamente corto, por ejemplo 32 promediaciones.
5. Calcular el indicador F_1 para todas las bandas de frecuencia y compararlo con el criterio $F_1 > 0.6$, si no se cumple, incrementar el tiempo de promediación, si aun así no se logra realizar la medición en periodos de menos variabilidad.

6. Si no puede mejorarse la medición, y si sólo unas pocas bandas de frecuencia no cumplen con el criterio, estas bandas pueden excluirse del cálculo del nivel de potencia sonora en ponderación A de la fuente, pero es necesario indicarlo en el informe de la medición. Para excluir las bandas de frecuencia, debe considerarse insignificante su influencia combinada en el nivel global de potencia acústica en dB(A), para verificarlo realizar los pasos siguientes.

- a. Para excluir una banda de frecuencias, el nivel de potencia sonora en ponderación A de esta banda debe ser inferior en 10 dB al nivel de banda en ponderación más alto.
- b. Para excluir varias bandas de frecuencias, la suma del nivel de potencia acústica en ponderación A para estas bandas debe ser inferior en 10 dB al nivel de banda en ponderación A más alto. El proceso es el siguiente:
- c. Calcular la potencia W_i por medio de la ecuación

$$W_i = 10^{-12} \cdot 10^{\left(\frac{L_{wi}}{10}\right)} \quad (68)$$

- d. Sumar los valores de potencia de estas bandas

$$W_{total} = \sum W_i \quad (69)$$

- e. Calcular el nivel total de estas bandas en dB

$$L_{W_{total}} = 10 \cdot \log\left(\frac{W_{total}}{10^{-12}}\right) = 10 \cdot \log\left(10^{\left(\frac{L_{w1}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{w2}}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{L_{wi}}{10}\right)}\right) \quad (70)$$

- f. Si $L_{W_{total}}$ es inferior en 10 dB al nivel más alto de la banda en ponderación A, es posible excluir estas bandas del cálculo de la potencia acústica.

Procedimiento Etapa 2

7. Una vez completada la etapa anterior, el siguiente paso es seleccionar el orden en el que se irá colocando la sonda en cada uno de los segmentos de la malla definida previamente.
8. Colocar la sonda según el orden definido y realizar mediciones de intensidad y presión acústica.
9. Calcular los indicadores de campo F_4 y F_5 , si los criterios se cumplen, la estimación de potencia sonora realizada será considera como resultado final.

10. Si no se cumplen con el criterio para F_4 para alguna de las frecuencias de medición, se puede mejorar la medición aumentando el número de posiciones en los segmentos en los que no se cumplió con el criterio, es decir, subdividir estos segmentos y realizar mediciones en estos nuevos subsegmentos.
11. Si no se cumplen con el criterio para F_5 , se puede mejorar la medición aumentando la distancia de medición desde la fuente de prueba.
12. Si no es posible mejorar la medición y si sólo unas pocas bandas de frecuencia no cumplen con el criterio, estas bandas pueden excluirse del cálculo del nivel de potencia sonora en ponderación A de la fuente, para ello seguir el paso 6 de la Etapa 1.

4.2.9. Cálculos

La potencia acústica parcial para cada segmento de la superficie de medición, y para cada banda de frecuencia está dada por la ecuación

$$W_i = I_{ni} S_i \quad (71)$$

El nivel de potencia acústica de la fuente será determinado por la ecuación

$$L_W = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^N \frac{W_i}{W_0} \quad (72)$$

Debido a que no es posible configurar el software utilizado en la adquisición de las señales para obtener directamente la intensidad I_{ni} durante las mediciones, es necesario realizar un post procesamiento de los datos tomados para su determinación, a continuación, se detalla.

1. Primeramente, es necesario convertir los valores capturados en dB a mV en el caso de los sensores, y a V^2 en el caso del espectro cruzado, esto por medio de la siguiente ecuación.

$$x(f) = 10^{\left(\frac{x(f)}{20}\right)} \cdot x_{ref} \quad (73)$$

donde $x_{ref} = 20\mu(\text{Pa o mV})$

Para el sensor de velocidad es necesario primero realizar la conversión de Pa^* a m/s .

2. El siguiente paso es corregir los valores anteriores utilizando la sensibilidad de los sensores obtenida en la calibración, dado que la sensibilidad está expresada en mV/Pa y mV/Pa* basta con dividir los valores entre la sensibilidad, con esto se convierten a Pa y Pa*.
3. Se forma un número complejo con los valores de amplitud y fase para corregir el espectro cruzado S_{pu}

$$S_{pu} = |S_{PU}| \cdot \cos(\varphi_{PU}) + i \cdot |S_{PU}| \cdot \sin(\varphi_{PU}) \quad (74)$$

4. Se corrigen los valores medidos por medio de

$$S_{pu,corr} = \frac{S_{pu}}{S_p \cdot S_u} \cdot ((\cos \varphi_{pu,cal}) - i \cdot \sin(\varphi_{pu,cal})) \quad (75)$$

5. Se calcula el argumento del número complejo anterior y este será el desfase corregido entre las señales de p y u .
6. Por último, con los valores corregidos de p , u y el desfase se calcula la intensidad por medio de la siguiente ecuación

$$I_{PU} = p_{PU} \cdot u_{PU} \cdot \cos(\varphi_{pu}) \quad (76)$$

4.2.9.1. Cálculo del nivel de potencia acústica de la fuente de ruido

El nivel de potencia acústica, [dB re 1pW], de la fuente de ruido en cada banda de frecuencia está dado por la ecuación:

$$L_W = 10 \log \sum_{i=1}^N \frac{W_i}{W_0} \quad (77)$$

Si $\sum_{i=1}^N P_i$ es negativo en cualquier banda de frecuencia, el método dado no es aplicable a esa banda.

4.3. Validación del sistema de medición de intensidad con sonda “p-u”.

La validación consiste en aportar evidencia objetiva de que el sistema es adecuado para su uso previsto, esto incluye la descripción del mensurando, el alcance de la medición, así como las condiciones de la validación.

La validación consistió en estimar la potencia acústica de una fuente sonora utilizando dos métodos diferentes: el método de intensidad y el método de presión. El método de intensidad se realizó utilizando el método de medición desarrollado, para el método de presión se realizó de acuerdo con la norma internacional *ISO 3744:2010 – Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane*. Una vez realizadas las mediciones y procesados los datos, los resultados fueron comparados.

4.3.1. Información de la medición

Las magnitudes medidas fueron, para el caso del método de intensidad: el nivel de presión acústica y la velocidad de la partícula; para el caso del método de presión: el nivel de presión acústica. La medición se realizó en un intervalo de medida de 100 Hz a 10 kHz y fue realizada en la cámara semianecoica del CENAM, la cual cuenta con las paredes y el techo cubierto de material acústico conocido comercialmente como SONEX, su frecuencia de corte es de 630 Hz.

Las dimensiones útiles de la cámara semianecoica son las siguientes:

Tabla 13. Dimensiones de la cámara semianecoica.

Dimensiones	Largo, [m]	Ancho, [m]	Alto, [m]
Interior	7	4	3

La estimación de potencia se realizó a la fuente sonora marca Brüel & Kjær modelo 4205.

4.3.2. Estimación de los niveles de potencia sonora por el método de intensidad

- Se definió una superficie de medición adecuada para el tamaño de la fuente sonora.
- El tipo de ruido es estacionario.

- La sonda no se ubicó a menos de 20 mm de cuerpos con temperatura significativamente diferente a la ambiental.
- Se evitó estar de pie sobre o próximo al eje de la sonda.
- La instrumentación utilizada fue la indicada en la tabla 2 y su configuración se muestra en la tabla 3. El software LabShop se configuró para registrar los siguientes parámetros:
 - Amplitud del espectro en frecuencia del sensor de presión p , dB re 20 μ Pa
 - Amplitud del espectro en frecuencia del sensor de velocidad u , dB re 20 μ Pa
 - Amplitud del espectro cruzado, dB re 20 μ Pa
 - La fase del espectro cruzado de los sensores p y u en grados
- La superficie de medición seleccionada fue un paralelepípedo, para ello se realizó una estructura acústicamente transparente, como se muestra en la figura 30. La superficie de medición se dividió en 20 segmentos, con 4 segmentos por cada lado de 30 cm x 30 cm cada uno.

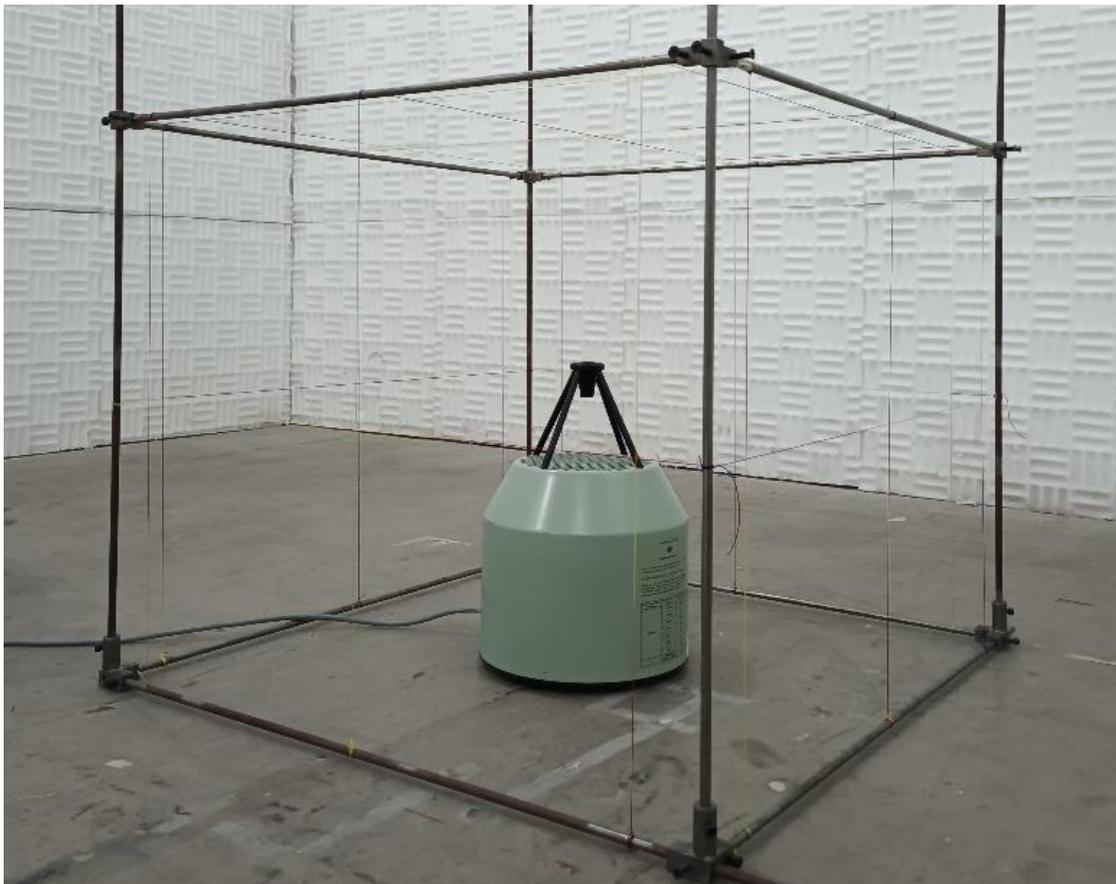


Figura 30. Fuente sonora B&K 4205 y superficie de medición.

Una vez que se preparó la fuente se procedió a realizar las mediciones de acuerdo al procedimiento propuesto y posteriormente se realizó el procesamiento de los datos mediante el software desarrollado para este fin.

4.3.3. Estimación de los niveles de potencia sonora por el método de presión

Al igual que para el método de intensidad, para realizar la medición se construyó una estructura acústicamente transparente, en ésta se colocaron 10 micrófonos, como se muestra en la figura 31. Es importante aclarar que, aunque la figura muestra dos fuentes, solo una de ellas se utilizó para realizar ambas mediciones. El equipo se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Equipo utilizado en el método de presión.

Instrumento	Marca	Modelo
3 Sistemas Pulse	Brüel & Kjær	3050-B-6/0
7 Micrófonos	Brüel & Kjær	4189-A-021
3 Micrófonos	Brüel & Kjær	4966-H-041
Calibrador acústico	Brüel & Kjær	4231

La ubicación de cada micrófono se determinó siguiendo la norma indicada anteriormente para este método, en la tabla 15 se muestran las coordenadas de cada micrófono con origen el centro de la superficie de medición al nivel del piso de la cámara.

Tabla 15. Coordenadas de ubicación de los micrófonos.

Posición	Micrófono	x [cm]	y [cm]	z [cm]
	Modelo			
1	4966-H-041	16	-96	22
2	4189-A-021	78	-60	20
3	4966-H-041	78	55	31
4	4189-A-021	16	90	41
5	4966-H-041	-83	32	45
6	4189-A-021	-83	-40	38
7	4966-H-041	-26	-65	71
8	4189-A-021	74	-7	67
9	4189-A-021	-26	50	83
10	4189-A-021	10	-10	99

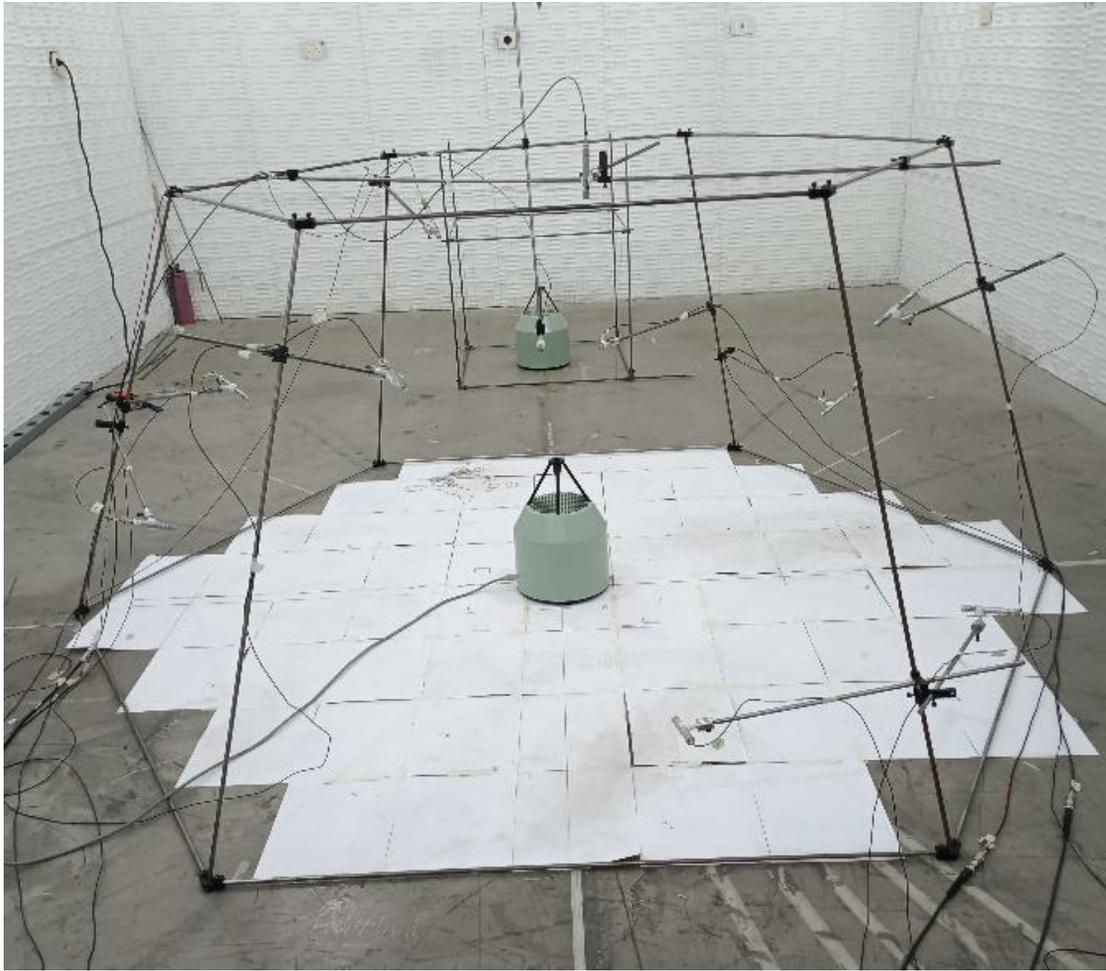


Figura 31. Fuente sonora B&K 4205 y ubicación de micrófonos.

Las dimensiones de la superficie de medición de la estructura se indican en la tabla 16.

Tabla 16. Dimensiones de la superficie de medición.

Dimensión	Valor, [cm]
Profundidad	48
Alto	49
Ancho	60
Radio	100

El área de la superficie fue de 6.28 m².

4.3.4. Resultados

A fin de cumplir con los requisitos de la norma ISO 3744:2010, en la tabla 17 y figura 32 se muestra el nivel de presión acústica máximo permitido de ruido de fondo junto con el nivel de presión acústica medido en la cámara semianecoica.

Tabla 17. Niveles sonoros medidos en la cámara semianecoica.

Frecuencia (Hz)	L_{RF} , [dB]	$L_{m\acute{a}x\ per}$, [dB]	Frecuencia (Hz)	L_{RF} , [dB]	$L_{m\acute{a}x\ per}$, [dB]
100	28.9	27.0	1 250	2.6	7.0
125	23.0	22.0	1 600	3.3	7.0
160	17.5	16.0	2 000	4.0	7.0
200	10.0	13.0	2 500	4.7	8.0
250	5.1	11.0	3 150	5.4	8.0
315	4.0	9.0	4 000	5.9	8.0
400	1.7	8.0	5 000	6.4	8.0
500	1.2	7.0	6 300	6.9	8.0
630	1.2	7.0	8 000	7.2	12.0
800	1.8	7.0	10 000	7.4	14.0
1 000	2.0	7.0			

Como se puede observar en la figura 32, la gran mayoría de las frecuencias cumple con el requisito de la norma, solo las frecuencias de 100 Hz, 125 Hz y 160 Hz no cumplieron con el criterio, sin embargo, como se podrá ver en la comparación con el método de intensidad, el ruido de fondo no afectó la medición.

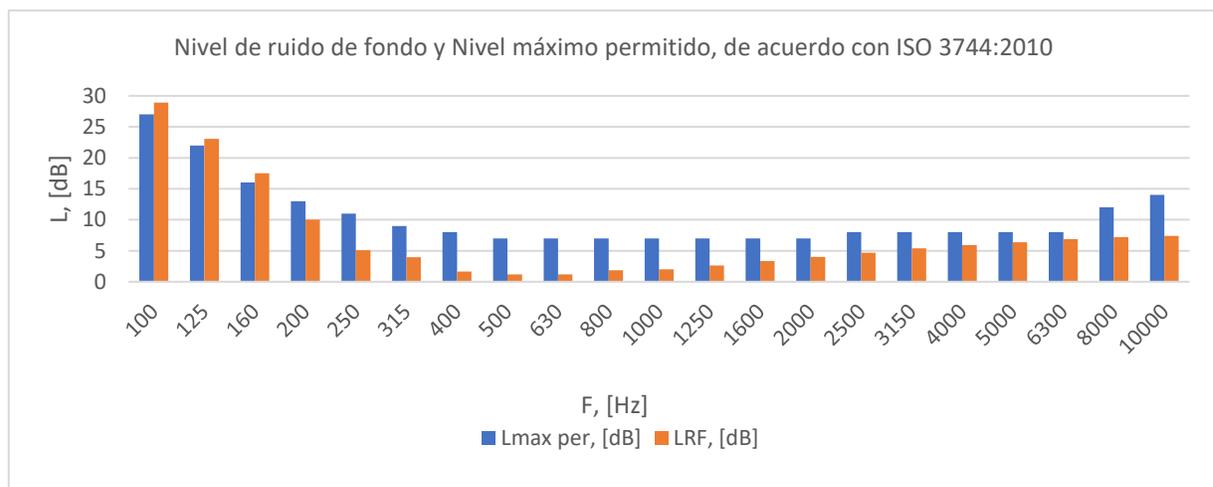


Figura 32. Nivel de presión acústica en la cámara semianecoica.

La tabla 18 muestra los resultados obtenidos para el método de presión.

Tabla 18. Resultados método de presión.

<i>F</i>, [Hz]	<i>L_{RF}</i>	<i>L_{cond med}</i>	<i>L_{corr por RF}</i>	<i>L_{W, cond med}</i>
100	28.92	74.46	74.46	82.44
125	23.05	69.83	69.83	77.81
160	17.50	68.10	68.10	76.09
200	10.04	65.28	65.28	73.26
250	5.11	63.69	63.69	71.67
315	3.96	61.39	61.39	69.37
400	1.65	59.49	59.49	67.47
500	1.18	59.96	59.96	67.94
630	1.16	61.35	61.35	69.34
800	1.83	62.67	62.67	70.65
1 000	2.01	64.39	64.39	72.37
1 250	2.62	60.91	60.91	68.89
1 600	3.33	58.85	58.85	66.83
2 000	4.01	58.88	58.88	66.86
2 500	4.68	56.34	56.34	64.32
3 150	5.38	56.12	56.12	64.10
4 000	5.93	53.56	53.56	61.54
5 000	6.37	51.74	51.74	59.72
6 300	6.86	49.23	49.23	57.21
8 000	7.19	45.65	45.65	53.63
10 000	7.41	43.19	43.19	51.17

En la tabla 19 se muestran los resultados obtenidos por el método de intensidad. La tabla muestra, además de los niveles de potencia acústica obtenidos, los indicadores de campo que menciona el método de medición a fin de evaluar las condiciones de medición y determinar la calidad de los resultados obtenidos.

Para comprobar la estacionalidad del campo sonoro, se utilizó el indicador de variabilidad temporal del campo acústico, F_1 , la evaluación se realizó utilizando en tiempo de promediación de 12 s para 10 mediciones, como lo sugiere la norma. El criterio a cumplir para este indicador es $F_1 \leq 0.6$, como se puede observar, el criterio se cumplió para todas las frecuencias, lo cual se puede explicar debido a que la fuente medida es una fuente de referencia que genera un campo acústico estable.

Tabla 19. Resultados obtenidos método de intensidad.

F , [Hz]	F_1	F_4	CF_4	F_5	L_{WL} , [dB re 1 pW]					
					Frontal	Derecha	Izquierda	Posterior	Superior	Total
100	0.00	0.02	0.00	0.01	73.61	72.87	73.39	73.43	72.94	80.25
125	0.01	0.02	0.01	0.01	71.03	70.09	70.91	70.40	69.29	77.38
160	0.01	0.02	0.01	0.01	67.76	67.38	68.64	67.14	66.80	74.58
200	0.01	0.03	0.01	0.01	64.42	64.91	65.47	65.21	63.13	71.69
250	0.01	0.03	0.02	0.01	63.19	62.59	63.28	62.46	60.53	69.50
315	0.01	0.03	0.02	0.01	60.51	60.89	61.44	60.99	58.47	67.56
400	0.01	0.03	0.01	0.01	59.65	59.06	59.29	59.27	59.03	66.26
500	0.00	0.03	0.01	0.01	58.54	58.36	58.60	58.42	62.27	66.54
630	0.02	0.05	0.05	0.01	59.41	59.70	59.83	59.73	64.33	68.08
800	0.01	0.04	0.04	0.01	61.92	61.79	62.06	62.19	64.48	69.61
1 000	0.01	0.02	0.01	0.01	63.54	63.67	63.87	64.13	65.99	71.33
1 250	0.01	0.02	0.01	0.01	60.02	60.24	60.16	60.61	63.64	68.17
1 600	0.01	0.02	0.01	0.01	58.27	58.30	58.66	59.34	61.12	66.27
2 000	0.02	0.05	0.07	0.01	56.53	56.83	56.84	57.94	62.47	65.80
2 500	0.02	0.05	0.08	0.01	55.35	55.09	55.19	55.88	59.78	63.68
3 150	0.02	0.07	0.13	0.01	54.36	54.12	53.97	54.87	61.02	63.72
4 000	0.01	0.06	0.11	0.01	52.42	52.01	52.23	53.02	58.13	61.31
5 000	0.03	0.07	0.14	0.01	50.71	50.40	50.72	51.38	56.07	59.48
6 300	0.03	0.08	0.09	0.01	49.82	49.55	49.59	49.72	53.76	57.84
8 000	0.03	0.09	0.00	0.01	46.98	46.83	46.46	46.76	52.37	55.59
10 000	0.03	0.08	0.00	0.01	45.28	45.60	44.46	45.08	51.85	54.52

Para controlar el número mínimo de segmentos necesarios para realizar la medición, se utilizó el indicador F_4 , el criterio para este indicador se da como $N > CF_4^2$, donde "N" es el número de puntos de medición y "C" es una constante que está en función de la frecuencia y el grado de exactitud deseado, se encuentra indicado en la norma ISO 9614-1 y en este documento se muestra en la tabla 4, para este caso se utilizó un factor el grado de exactitud 2 (Ingeniería). Dado que fueron 20 puntos de medición, la medición cumplió ampliamente con este criterio.

El indicador F_5 , error de reactividad, utilizado para controlar los errores de sesgo introducidos por la sonda, también cumplió con el criterio de $F_5 < 2s$ (ver punto 4.1.6.).

Por lo anterior, se considera que la medición de intensidad realizada con la sonda cumplió con todas las condiciones para todas las frecuencias, por lo tanto, los resultados obtenidos son válidos.

Por último, la tabla 20 y figura 33 se muestran los niveles de potencia acústica obtenidos con ambos métodos.

Tabla 20. Niveles de potencia sonora obtenidos en cada método de medición.

Frecuencia, Hz	L_{WL} , [dB re 1 pW]		E_n
	Método de intensidad	Método de presión	
100	82.44	80.25	0.6
125	77.81	77.38	0.1
160	76.09	74.58	0.4
200	73.26	71.69	0.6
250	71.67	69.50	0.7
315	69.37	67.56	0.6
400	67.47	66.26	0.5
500	67.94	66.54	0.6
630	69.34	68.08	0.6
800	70.65	69.61	0.6
1 000	72.37	71.33	0.6
1 250	68.89	68.17	0.4
1 600	66.83	66.27	0.3
2 000	66.86	65.80	0.6
2 500	64.32	63.68	0.3
3 150	64.10	63.72	0.2
4 000	61.54	61.31	0.1
5 000	59.72	59.48	0.1
6 300	57.21	57.84	0.2
8 000	53.63	55.59	0.6*
10 000	51.17	54.52	1.0*
Total	84.5	86.0	0.4

Para comprobar la compatibilidad de las mediciones realizadas entre ambos métodos se utilizó el error normalizado, E_n , (NMX-EC-17043-IMNC-2010) el cuál es un criterio estadístico de desempeño para resultados cuantitativos muy utilizado en pruebas de laboratorio, determina la desviación con respecto a un valor de referencia permitiendo su comparación, utilizando los valores obtenidos y sus incertidumbres expandidas. El error normalizado se calcula por medio de la ecuación siguiente:

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 - U_{ref}^2}} \quad (78)$$

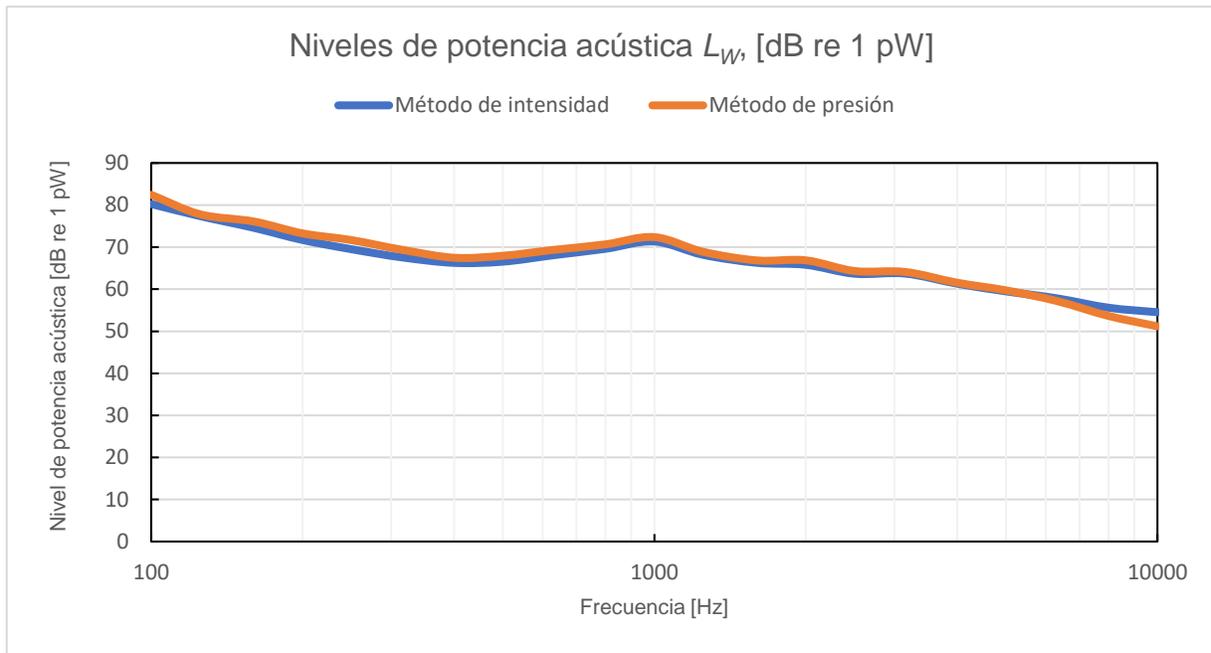


Figura 33. Niveles de potencia sonora obtenidos en cada método de medición.

El criterio de desempeño es:

- Satisfactorio: cuando el valor absoluto del error normalizado es menor o igual a 1.
- No satisfactorio: cuando el valor absoluto del error normalizado es mayor que 1.

En el método de intensidad se utilizaron las incertidumbres que indica la norma ISO 9614-1 para el grado de ingeniería (Tabla 1), sin embargo, debido a que la norma solo indica incertidumbres hasta 6 300 Hz, para las frecuencias de 8 000 y 10 000 se utilizó la incertidumbre de la frecuencia de 6 300 Hz a fin de realizar el cálculo.

Como se observa en la tabla 19, los niveles obtenidos en todas las frecuencias son compatibles, el error normalizado es menor o igual a 1 en todos los casos. Por lo que se valida el sistema de medición y se concluye que es apropiado para el uso previsto.

En los cálculos anteriores se utilizó un error de fase φ_{ue} de 2° , como sugiere Fernández et al. 2014, para el procedimiento de calibración utilizado, ver ecuación (67).

5. Conclusiones

Se desarrolló un sistema de medición para la determinación de potencia acústica, el control de ruido y la identificación de fuentes de ruido, basado en la sonda de intensidad “p-u”. De igual manera, el sistema permitirá trabajar en diferentes aplicaciones como la clasificación de las fuentes de ruido, la visualización de campos sonoros, la determinación de pérdidas de transmisión, entre otras.

Se desarrolló un método de calibración para la sonda “p-u” que permite dar trazabilidad metrológica a los resultados de sus mediciones a patrones nacionales. El monopolo fabricado para este fin permite contar con un método adecuado de calibración, el intervalo en frecuencia alcanzado fue de 60 Hz a 10 kHz, sin embargo, es posible alcanzar un intervalo más amplio utilizando una fuente de mejor calidad que cuente con intervalo en frecuencia más amplio.

Realizar la calibración dentro de la cámara anecoica evitó las reflexiones que se generan en un recinto no acondicionado acústicamente, esto permitió alcanzar una frecuencia más baja además de evitar un procesamiento posterior de las señales. Los valores obtenidos en la calibración se acercaron considerablemente a los reportados por el fabricante en el certificado original de la sonda, lo cual confirmó la validez de la calibración.

De manera adicional, CENAM podrá ofrecer el servicio de calibración de sondas “p-u” a los usuarios que cuente con estos equipos en el país, lo cual permitirá dar confiabilidad a sus mediciones y cumplir con los requisitos de calidad.

Se realizó un programa en Octave que automatiza el procesamiento de los datos obtenidos en la medición de intensidad sonora, el programa está desarrollado para utilizarse en una superficie de medición en forma de paralelepípedo y para cualquier número de segmentos. El programa calcula, por frecuencia, los niveles de potencia acústica para cada una de las caras del paralelepípedo, la potencia total y los indicadores de campo F1, F4 y F5. Adicionalmente, se desarrolló otro programa en Octave para el procesamiento de los datos obtenidos en la calibración, con este programa se calculan la sensibilidad del sensor de presión y de velocidad. Para el sensor de velocidad, obtiene las curvas de calibración para bajas y altas frecuencias con un ajuste polinomial, posteriormente realiza el desplazamiento de la curva de bajas frecuencias a fin de conectarla con la de altas frecuencias y por último realiza la unión de ambas curvas obteniendo así la curva final. Con el desarrollo de estos programas se podrá realizar la determinación de la potencia sonora y la calibración de la sonda de forma rápida y

confiable. Debido a la confidencialidad de estos programas no es posible mostrarlos en este documento.

Se validó el sistema de medición de intensidad desarrollado, la validación se realizó comparándolo con un método diferente, un método normalizado, el error normalizado obtenido en la comparación de ambos métodos permite asegurar la compatibilidad entre estos. La utilización de una fuente de referencia permite dar confiabilidad a la validación.

Algunos trabajos futuros que pueden desarrollarse son:

- Realizar la calibración en un recinto sin acondicionamiento acústico y comparar los resultados con los obtenidos en la cámara anecoica.
- Realizar la comparación entre la sonda “p-u” y una sonda “p-p” en la determinación de potencia acústica de una fuente.
- Obtener los valores de fase de ambos transductores durante el proceso de calibración.

Referencias

1. A. Bies, D., & H. Hansen, C. (2009). *Engineering Noise Control. Theory and practice*. Spon Press.
2. A. Russell, D., P. Titlow, J., & Bemmen, Y.-J. (1999). Acoustic monopoles, dipoles, and quadrupoles: An experiment revisited. *American Journal of Physics*, 67(8).
3. Bernard Ginn, K., & Haddad, K. (2012). Noise source identification techniques: simple to advanced applications. *Acoustics 2012*. Nantes, France.
4. *Brüel & Kjær*. (1993). Obtenido de Brüel & Kjær: <https://www.bksv.com/>. Lecture Note. Sound intensity. Recuperado el 2021/05/14.
5. CENAM. (2020). Obtenido de <https://www.gob.mx/cenam/que-hacemos>. Recuperado el 2020/04/06.
6. Concha-Barrientos, M., Campbell-Lendrum, D., & Steenland, K. (2004). *Occupational noise: assessing the burden of disease from work-related hearing impairment at national and local levels*. Geneva,: World Health Organization.
7. Contreras Quevedo, C. A. (2013). Actitudes Acerca de la Protección Auditiva y Pérdida de la Audición en Trabajadores de una Planta Compresora de Gas Costa-Afuera. *Ciencia & Trabajo*, 35/39.
8. Crocker, M., & Arenas, J. (2003). Fundamentals of the Direct Measurement of Sound Intensity and Practical Applications. *Acoustical Physics*, 49(2), 163-175.
9. de Bree, H.-E. (2009). *The Microflown E-book*. Obtenido de <https://www.microflown.com/resources/e-books/e-book-the-microflown-e-book>. Recuperado el 17/04/2020.
10. EEA. (2020). *Environmental noise in Europe — 2020, EEA Report No 22/2019, European Environment Agency*. Obtenido de <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>. Accesado 23 Octubre 2020.
11. Esquivel Delgado, A. (Febrero de 2008). *Nuevas técnicas para la determinación del aislamiento acústico de materiales de construcción*. Recuperado el 26 de Febrero de 2021, de <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/7917/1/NUEVASTEC.pdf>
12. EU. (2005). *Directive 2005/88/EC of the European Parliament and the Council of 14 December 2005 amending Directive 2000/14/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to the noise emission in the environment by equipment for use outdoors*. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32005L0088&from=EN>. Recuperado el 22/11/2020
13. F. Barron, R. (2003). *Industrial Noise Control and Acoustics*. New York: Marcel Dekker, Inc.
14. Fahy, F. (1995). *Sound Intensity*. England: CRC Press.
15. Fahy, F. (2005). *Foundations of Engineering Acoustics*. Elsevier Academic Press.

16. Fernández Comesaña, D., Oytun Peksel, B., & de Bree, H.-E. (2014). Expanding the sound power measurement criteria for sound intensity p-u probes. *The 21st International Congress on Sound and Vibration*. Beijing, China.
17. G. Tijs, E. H., Nejade, A., & de Bree, H. E. (2009). Verification of P-U intensity calculation. *Noise and Vibration: Emerging Methods*. Oxford.
18. Gob. (2017). *Objetivo de Desarrollo Sostenible 3: Salud y Bienestar*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agenda2030/articulos/3-salud-y-bienestar>. Recuperado el 08/10/2020.
19. H. Basten, T. G., & de Bree, H.-E. (2009). Full bandwidth calibration procedure for acoustic probes containing a pressure and particle velocity sensor. *Acoustical Society of America. Journal*, 127(1), 264-270.
20. Hansen, C. (1995). Fundamental of acoustics. En C. H. Berenice Goelzer, *Occupational exposure to noise: evaluation, prevention and control*. Switzerland: World Health Organization.
21. Harrison, M. (2004). *Vehicle Refinement: Controlling Noise and Vibration in Road Vehicles*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
22. ISO 17025. (s.f.). *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*.
23. ISO 80000-8:2021. (s.f.). *Quantities and units - Part 8: Acoustics*.
24. ISO 9614-1. (1993). Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity — Part 1: Measurement at discrete points.
25. Jacobsen, F. (2001). State of the Art of Sound Intensity and Its Measurement. *17th The International Congress on Acoustics*. Roma.
26. Jacobsen, F. (2007). *An elementary introduction to acoustics*. Technical University of Denmark.
27. Jacobsen, F. (Octubre de 2011). Sound intensity and its measurement and applications. *Nota no. 31262*. Denmark.
28. Jacobsen, F. (2014). Sound Intensity. En T. Rossing, *Springer Handbook of Acoustics*. New York: Springer.
29. Jacobsen, F., & de Bree, H.-E. (2005). A comparison of two different sound intensity measurement principles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1510-1517.
30. Jacobsen, F., & Jaud, V. (2006). A note on the calibration of pressure-velocity sound intensity probes. *Acoustical Society of America. Journal*, 120, 830-837.
31. Jacobsen, F., Cutanda, V., & M. Juhl, P. (1998). A numerical and experimental investigation of the performance of sound intensity probes at high frequencies. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103.
32. L. Themann, C., & A. Masterson, E. (2019). Occupational noise exposure: A review of its effects, epidemiology, and impact with recommendations for reducing its burden.

The Journal of the Acoustical Society of America, 146(5), 3879. <https://doi.org/10.1121.1121.1.5134465>
Obtenido de <https://doi.org/10.1121/1.5134465>

33. Le, T., Straatman, L., Lea, J., & Westerberg, B. (2017). Current insights in noise-induced hearing loss: a literature review of the underlying mechanism, pathophysiology, asymmetry, and management options. *Journal of Otolaryngol - Head & Neck Surg*(46), 41. doi:<https://doi.org/10.1186/s40463-017-0219-x>
34. Maling Jr., G. (2007). Noise. En R. T.D., *Springer Handbook of Acoustics*. Springer, New York, NY.: Maling Jr. G.C. (2014) Noise. In: Rossing T.D. (eds) *Springer Handbook of Acoustics*. Springer Handbooks. Springer, New York, NY.
35. Martina, B. (2014). *Comparison calibration of low-cost prototypes of acoustic pressure-velocity probes and some application case-studies*. Università degli Studi di Ferrara.
36. NMX-EC-17043-IMNC-2010. (s.f.). *Evaluación de la conformidad -Requisitos generales para los ensayos de aptitud*.
37. OMS. (2019). *Sordera y pérdida de la audición*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>. Recuperado el 10/10/2020.
38. ONU. (2015). Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>. Recuperado el 08/10/2020.
39. Raangs, R. (2005). Exploring the use of the microflown. *Tesis*.
40. Rossing, T. (2014). Introduction to Acoustics. En T. Rossing, *Springer Handbook of acoustics*. Springer, New York, N.Y.: Springer Handbooks. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0755-7_1
41. Schneider, E. (2005). *RISK OBSERVATORY. THEMATIC REPORT. Noise in figures*. Belgium: European Agency for Safety and Health at Work.
42. W. Lang, W., & C. Maling Jr., G. (2007). Noise as a Technological and Policy Challenge. *The Bridge*, 4-10.
43. Yunus, M., Alsoufi, M., & Hussain, I. (2015). Sound Source Localization and Mapping Using Acoustic Intensity Method for Noise Control in Automobiles and Machines. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(7).