



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Nuevas técnicas para la determinación del aislamiento acústico de materiales de construcción

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTA:

ING. ADOLFO ESQUIVEL DELGADO

DIRECTOR: DR. JOSE ANGEL ORTEGA HERRERA.

México, Febrero 2008.



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 16 del mes de Abril del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

“NUEVAS TÉCNICAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN”

Presentada por el alumno:

ESQUIVEL

DELGADO

ADOLFO

Apellido paterno

materno

nombre(s)

Con registro:

B	9	5	0	6	4	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

Presidente

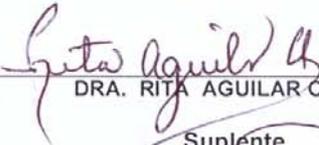

DR. JOSE ANGEL L. ORTEGA HERRERA


DR. SAMUEL ALCANTARA MONTES

Segundo Vpcal

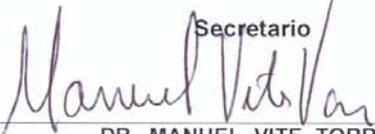
Tercer Vocal


DRA. ITZALA RABADAN MALDA


DRA. RITA AGUILAR OSORIO

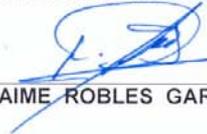
Secretario

Suplente


DR. MANUEL VITE TORRES


M. EN C. CANDIDO PALACIOS MONTUFAR

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


DR. JAIME ROBLES GARCÍA



CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de México, Distrito Federal, el día 6 de Febrero del año 2009, el que suscribe Adolfo Esquivel Delgado, alumno del Programa de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Mecánica con registro B950648, adscrito a la Sección de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. José Angel Ortega Herrera, y cede los derechos del trabajo intitulado: **Nuevas técnicas para la determinación del aislamiento acústico de materiales de construcción**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este permiso puede ser obtenido escribiendo a la siguientes direcciones:

aesquive@cenam.mx ó oeha430210@hotmail.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Adolfo Esquivel Delgado

ÍNDICE

Resumen

Abstract

Glosario de términos

1 Introducción

2 Estado del Arte

2.1 Mediciones acústicas

2.2 Medición de la intensidad acústica

2.3 Aislamiento acústico por la técnica de intensidad acústica

3 Técnicas de estimación de aislamiento acústico

3.1 Principios de medición de intensidad acústica

3.1.1 Método basado en el principio p-p

3.1.2 Errores de medición en la técnica de intensidad acústica

3.1.2.1 Aproximación por diferencia-finita

3.1.2.2 Desfasamiento de la instrumentación

3.1.3 Indicadores de campo

3.2 Sonido en recintos

3.2.1 Frecuencias y modos naturales

3.2.2 Densidad modal

3.2.3 Factor de traslape modal

3.2.4 Tiempo de reverberación

3.3 Teoría del aislamiento acústico

3.3.1 Radiación acústica por estructuras

3.3.1.1 Medición de potencia radiada

3.3.1.2 Definición de la eficiencia de radiación

3.3.2 Aislamiento acústico de particiones simples

3.3.3 Aislamiento acústico de particiones dobles

3.4 Normatividad para la medición del aislamiento acústico

- 3.4.1 Aislamiento acústico por el método de presión
 - 3.4.2 Aislamiento acústico por la técnica de intensidad acústica
 - 3.4.3 Correcciones a bajas frecuencias
 - 3.4.4 Comparación entre la técnica de presión e intensidad acústica
- 4 Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad acústica
- 4.1 Infraestructura empleada y particiones de prueba
 - 4.1.1 Método de laboratorio
 - 4.1.1.1 Descripción de la cámara de transmisión
 - 4.1.1.2 Descripción y montaje de las particiones de prueba
 - 4.1.2 Método *in situ*
 - 4.1.2.1 Descripción de las instalaciones empleadas
 - 4.1.2.2 Montaje de la partición
 - 4.2 Equipo empleado, y su calibración
 - 4.2.1 Equipo de medición
 - 4.2.2 Calibración de la sonda de intensidad por el método del acoplador
 - 4.3 Discretización de la superficie de medición
 - 4.4 Estimación del índice de reducción de ruido por el método de laboratorio
 - 4.4.1 Efecto de la posición de la fuente sonora
- 5 Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora
- 5.1 Método Clásico de estimación del Aislamiento Sonoro
 - 5.2 Determinación del Aislamiento Sonoro usando intensidad sonora
 - 5.3 Mediciones en la Cámara de Transmisión del CCADET-UNAM
- 6 Conclusiones y recomendaciones
- Referencias bibliográficas
-

Resumen

El aislamiento sonoro de muros divisorios en construcciones para sonidos de origen aéreo es sumamente complejo y difícil de medir o modelar teóricamente. Su determinación se basa en simplificaciones razonables que permiten mediciones de laboratorio repetibles y reproducibles. Por lo cual los valores de medición divergen de lo estimado teóricamente. Esta situación ha impulsado numerosas investigaciones que mejoran tanto los modelos teóricos como los procedimientos de medición para disminuir estas discrepancias. En particular la técnica por intensidad sonora es una herramienta útil en este esfuerzo. En esta técnica, es importante investigar, el efecto de diferentes parámetros sobre el valor del índice de reducción sonora (*SRI*, por sus siglas en inglés), tales como: posiciones de la fuente sonora en el cuarto fuente, espaciadores de micrófonos de la sonda de intensidad, distancia muestra-sonda y densidad de puntos necesarios en la superficie de medición. Esta investigación experimental se realizó en cuatro materiales prefabricados de uso frecuente en México. Se utilizó como referencia la estimación del *SRI* realizada en la Cámara de Transmisión del CCADETUNAM, mediante la técnica de presión sonora, para comparar estas mediciones. Como resultado, podemos asegurar que si se aplican minuciosamente los conocimientos actuales de la medición de potencia sonora por el método de intensidad sonora, ésta puede emplearse de manera confiable en la estimación del aislamiento sonoro de sonidos de origen aéreo dentro de esta Cámara de Transmisión, en el intervalo de frecuencia de 250 Hz a 5000 Hz para materiales prefabricados.

Palabras clave: Sonido transmitido a través de paredes, Mediciones de intensidad sonora, Metrología, mediciones y procedimientos de laboratorio.

PACS: 43.55.+p, 43.58.+z, 06.20.-f,

Abstract

Evaluating sound isolation of dividing walls in constructions for airborne sounds is very complex and difficult either to measure or to model theoretically. Its determination is based on reasonable simplifications that allow laboratory measurements being repeatable and reproducible. Because of that, measurement values diverge from theoretical values. The situation has given rise to different works that improve both, the theoretical models and the measurement procedures in order to reduce such discrepancies. Specially, the sound intensity technique is a useful tool in this effort. In this technique it is important to experimentally investigate the effect of different parameters on the Sound Reduction Index (*SRI*), such as the position of the sound source in the source room, the microphone's spacers of the sound intensity probe, distance building sample-sound intensity probe and density of the array of measurement positions. Experimental research results presented in this paper are about four pre-fabricated materials of common use in México. The measurement based on sound pressure inside the CCADET-UNAM's Transmission Suite is used as reference for comparing these measurements. We found that if the detailed knowledge of measuring sound power using sound intensity is followed, the determination of airborne sound insulation can be made with confidence in the frequency interval from 250 Hz to 5000 Hz inside this transmission suite for pre-fabricated materials.

Descriptors: Sound transmission through walls, Sound intensity measurements, Metrology, measurements, and laboratory procedures.

Glosario de Términos

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico, el incremento de los medios de transporte, los hábitos culturales y el crecimiento urbano, carente en muchos casos de una planificación adecuada, son entre otras cosas, algunos de los factores que han contribuido en gran medida a la degradación acústica del medio; es decir, el origen del ruido lo encontramos en las actividades humanas y está asociado especialmente a los procesos de urbanización y al desarrollo del transporte y de la industria. El ruido se puede considerar el cuarto contaminante para el hombre y para el medio ambiente, después del aire, del agua y de los residuos sólidos, tanto en el medio industrial como en el urbano¹.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha declarado que el ruido tiene efectos muy perjudiciales para la salud, entre lo cuales se pueden mencionar desde trastornos puramente fisiológicos, como la conocida pérdida progresiva de audición, hasta los psicológicos, al producir una irritación y un cansancio que provocan disfunciones en la vida cotidiana, tanto en el rendimiento laboral como en la relación con los demás.

Desde 1980, la OMS ha abordado el problema del ruido urbano. Las guías para el ruido urbano relacionadas con la salud pueden servir de base para preparar normas teniendo como referencia la gestión del ruido. Los aspectos claves de la gestión del ruido incluyen las opciones para reducirlo, modelos de predicción y evaluación del control en la fuente, normas de emisión de ruidos para fuentes existentes y planificadas, evaluación de la exposición al ruido y las pruebas de cumplimiento de la exposición al ruido con las normas de emisión.

Las viviendas deben ser diseñadas y construidas de tal manera que el ruido percibido por los ocupantes sea de niveles que no dañen la salud, y les permitan dormir, descansar y trabajar en condiciones satisfactorias. Las cantidades que definen la calidad acústica de las viviendas son el aislamiento acústico por vía aérea, aislamiento acústico a ruido por impacto, aislamiento acústico de fachadas, tiempo de reverberación de los cuartos y el nivel de ruido causado por las instalaciones técnicas. El objetivo fundamental del control de ruido es proveer al ser humano de un ambiente acústico aceptable, interior y exterior, de tal manera que la intensidad y el carácter de todos los sonidos en o alrededor de un edificio, sean compatibles con el uso específico de cada espacio. El control de ruido inicia desde la definición de los límites

permisibles, los cuales no se encuentran estandarizados; no obstante, la OMS establece que el nivel de ruido en el interior de viviendas no debe exceder 30 dBA, y en oficinas, aulas de clase y lugares de trabajo no debe exceder los 35 dBA², por ejemplo.

El aislamiento acústico es la cantidad física más importante que define la calidad acústica de las viviendas, el cual se define como la protección de un recinto contra la penetración de sonidos o ruido; y el objeto de ello es precisamente reducir el ruido, tanto aéreo como estructural, que llega al receptor a través de los obstáculos (paredes, techo, piso). Dependiendo del uso de las viviendas se definen los requerimientos en cuanto a aislamiento acústico de las paredes para aislarlo del ruido del exterior o viceversa; es decir, el aislamiento acústico de una pared debe ser diseñado sobre las bases de los niveles de ruido medidos del lado ruidoso y sobre el límite permisible, según la OMS, del otro lado de la pared.

La propagación del sonido en el aire depende principalmente del tipo de fuentes de ruido, de su distribución en el espacio y de la geometría, así como de las condiciones del espacio en que se realiza la propagación. El ruido puede transmitirse a través de múltiples vías, a través del aire o de un medio sólido en el que parte del sonido será reflejado, absorbido, y transmitido a través de un objeto. Estas cantidades dependen de las propiedades, forma, espesor y método de montaje del objeto; así como del ángulo de incidencia y del tipo de onda acústica incidente. Los campos acústicos generalmente son descritos en términos de la presión acústica, aunque como se sabe, son también campos de energía en los cuales las componentes cinética y potencial son generadas, transmitidas y disipadas. En cualquier punto de un campo acústico la intensidad instantánea expresa la magnitud y dirección del flujo de energía acústica. Una aplicación principal de la medición directa de la intensidad acústica es la determinación de la potencia acústica de una máquina o equipo instalada *in situ*; así también es útil en la medición del aislamiento acústico de estructuras.

El aislamiento acústico consiste en conseguir que la energía que atraviesa una barrera sea lo más baja posible, lo implica que se deben instalar materiales que tengan una impedancia muy diferente a la del medio que conduce el sonido. Actualmente existen dos técnicas normalizadas (tanto en laboratorio como *in situ*) para la evaluación del aislamiento acústico o índice de reducción de ruido de particiones o paneles: el método convencional o método de presión y la

técnica de intensidad acústica. El primer método exige una cámara de transmisión formada por dos cuartos reverberantes aislados mutuamente por vía aérea y estructuralmente cuyas características y volúmenes están definidos en la norma ISO 140-1³. Un aislamiento pobre entre los cuartos reverberantes de la cámara de transmisión puede presentarse cuando las muestras a evaluar son pequeñas o de una alta densidad superficial. Otra de las limitantes del método convencional es el flanqueo (transmisión de sonido por trayectorias diferentes a la evaluada), el cual puede causar sobreestimación de la potencia acústica radiada por la muestra de prueba, produciendo en consecuencia una subestimación del índice de reducción de ruido.

El método de intensidad acústica para la determinación del índice de reducción de ruido se recomienda en lugar del método convencional, en situaciones donde la transmisión por flanqueo es considerable. En ambos métodos, el flanqueo y el ruido de fondo dentro del recinto receptor limitan el valor más alto medible del índice de reducción de ruido^{4,5,6}. Sin embargo, el flanqueo puede ser reducido al mínimo durante las mediciones de intensidad acústica siguiendo los criterios establecidos en la norma ISO 9614-1⁷.

En México solo existe una cámara de transmisión que cumple con las especificaciones estipuladas por la norma ISO 140-1³ y ASTM E90-04 para mediciones del índice de reducción de ruido, la cual está ubicada en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Sin embargo, dicha cámara en muy raras ocasiones ha sido empleada para tal propósito debido a que en México no existe una normativa sobre las exigencias del índice de reducción de ruido de los diferentes materiales de construcción empleados en las viviendas. No obstante, actualmente existe un creciente interés de las empresas nacionales fabricantes de materiales de construcción en medir los índices de reducción de ruido de sus productos debido a que es parámetro exigido por el mercado internacional. A raíz de ello, y como una primera parte hacia la concientización de crear ambientes acústicos de buena calidad, en este trabajo se presentan los diferentes métodos de laboratorio para medición del índice de reducción de ruido, y además se muestra que es posible obtener resultados muy semejantes de ese parámetro bajo condiciones *in situ*.

El objetivo principal de la presente tesis es comparar la técnica de intensidad acústica para la estimación del aislamiento acústico en la cámara de transmisión del CCADET contra aquellos

valores obtenidos en las instalaciones del Centro Nacional de Metrología (CENAM), la cual es considerada una medición *in situ* dado que el cuarto fuente no cumple con el requerimiento de volumen mencionado en la norma ISO 15186-1⁸. La primera parte de este estudio consiste en estimar el índice de reducción de ruido por la técnica de intensidad acústica en la cámara de transmisión del CCADET y comparar los valores con aquellos obtenidos por el método convencional para cuatro muestras dobles. Las variables empleadas para el método de intensidad son el espaciador entre micrófonos, distancia muestra de prueba-sonda de intensidad, densidad de puntos de medición en la malla de la superficie de medición, posición del material absorbente dentro del recinto receptor, número de posiciones de la fuente sonora, flanqueo debido al montaje de las muestras, repetibilidad y corrección a altas frecuencias debido a la sensibilidad en presión de los micrófonos de condensador de la sonda de intensidad. Asimismo, para la comparación entre los valores del índice de reducción de ruido mediante la técnica de intensidad y aquellos obtenidos por el método convencional, es aplicada la corrección a bajas frecuencias (corrección de Waterhouse) a los valores dados por la técnica de intensidad, tal y como es sugerido por la norma ISO 15186-1⁸.

La segunda parte del trabajo consiste en comparar los valores del índice de reducción de ruido obtenidos por la técnica de intensidad en condiciones de laboratorio en el CCADET, con aquellos estimados bajo condiciones *in situ* en el CENAM, sin considerar la corrección de Waterhouse. Las variables en las mediciones *in situ* son el espaciador entre micrófonos, distancia muestra de prueba-sonda de intensidad, número de posiciones de la fuente sonora, flanqueo debido al montaje de las muestras, repetibilidad y corrección a altas frecuencias debido a la sensibilidad en presión de los micrófonos de condensador de la sonda de intensidad. Las variables de gran interés entre el método de laboratorio e *in situ* es el montaje y tamaño de la muestra.

2. ESTADO DEL ARTE

La acústica es una rama de la física que estudia la producción, control, transmisión, recepción y efectos del sonido (ondas mecánicas en gases líquidos y sólidos). Su origen inicia con el estudio de las vibraciones mecánicas y la radiación de estas a través de ondas mecánicas. La investigación en esta área fue realizada en muchos de los procesos físicos fundamentales involucrados en las ondas y en posibles aplicaciones de estos procesos en la vida moderna, lo cual sido fundamental, por ejemplo, en el desarrollo de la acústica arquitectural y la psicoacústica, la cual se define como el estudio de la percepción subjetiva de los sonidos por el ser humano.

En el presente apartado se presenta a grandes rasgos el desarrollo cuanto a mediciones acústicas, desde la interpretación de la onda acústica hasta los transductores empleados para la medición del sonido. Asimismo, se aborda el desarrollo la intensidad acústica en cuanto a los principios de medición, sus errores principales de medición y sus aplicaciones, entre las que se destaca la determinación de potencia acústica de fuentes sonoras, y el aislamiento acústico de particiones Dentro de este último, se toca los aspectos relaciones a los métodos y sus principales errores de medición.

2.1 Mediciones acústicas

El fenómeno físico llamado sonido puede ser definido como un disturbio oscilatorio de la densidad de un fluido que percibe un ser humano, el cual es asociado con pequeños movimientos vibratorios de las partículas de este que transportan energía sobre grandes distancias de propagación. La primera teoría de la propagación del sonido comenzó con Isaac Newton (1642-1727), cuyo Principia (1686) incluía una interpretación matemática del sonido como "pulsos" de presión transmitidos a través de partículas de fluido colindantes

El progreso substancial hacia el desarrollo de una teoría viable de la propagación del sonido, descansando sobre firmes conceptos físicos y matemáticos, fue realizado durante el siglo

XVIII por Euler (1707-1783), Lagrange (1736-1813) y d'Alembert (1717-1783). La ecuación de onda emergió en un número de contextos incluyendo la propagación del sonido en el aire. La teoría propuesta para el sonido en el siglo XVIII estuvo incompleta desde muchos puntos de vista, pero las teorías modernas pueden ser consideradas como refinamientos de aquella desarrollada por Euler y sus contemporáneos⁹.

En 1858 Scout diseñó el fonautógrafo el cual consiste de un cuerno terminado por un diafragma flexible. Por medio de un diseño de palanca, un dispositivo fue hecho para mover en asonancia con el movimiento del diafragma y así trazar el movimiento de vaivén (de la onda acústica). Este fue el primer uso de un diafragma para producir sonido¹⁰.

Lisajous, quien publicó en 1857 su artículo "*Memoire sur l'étude optique des mouvement vibratoires*", establece que por medios ópticos es posible determinar con facilidad y aceptable exactitud tanto el intervalo como la diferencia de fase entre dos movimientos vibratorios. Este hecho hace del comparador óptico uno de los instrumentos más importantes a la disposición de los acústicos¹⁰.

El disco de Rayleigh, inventado por Lord Rayleigh en 1882, pasó a ser, después del análisis teórico de su funcionamiento en 1891 por Koenig, un instrumento ampliamente usado para la medición de la velocidad de la partícula en una onda acústica¹⁰. De esta manera, los avances principales durante el siglo XIX involucran cuatro aspectos de la acústica: (i) medición de la velocidad del sonido, (ii) determinación de la frecuencia (llamada pitch), (iii) determinación de la velocidad de la partícula y (iv) observaciones sobre el timbre.

La contribución de Wente fue el desarrollo de un micrófono electroestático con una alta impedancia del diafragma, amplio intervalo de frecuencia, buena estabilidad, y la facilidad de ser calibrado con la ayuda de un termófono. Hasta 1916 solamente cuatro métodos habían sido mejorados para la determinación de la intensidad acústica: (i) el método del disco de Rayleigh para la determinación de la velocidad de la partícula en un campo de onda plana, (ii) el método de medición del incremento de presión en una pared reflejante de acuerdo a la teoría

de Rayleigh y la técnica experimental de Altberg, (iii) el método de medición de los cambios de presión en los nodos de una onda estacionaria por un mano metro debido al trabajo de Raps, y (iv) diferentes variaciones del método haciendo uso de interferencia óptica¹⁰.

La acústica se consolidó como una nueva ciencia a partir de los años 30, con posterioridad a la prematura muerte de Sabine (quien descubrió que la reverberación de un recinto es inversamente proporcional a la cantidad de absorción del mismo -ecuación de reverberación de Sabine) en 1919. Esto se debió fundamentalmente por el desarrollo de la tecnología de micrófonos, amplificadores y altavoces, y su utilización como herramienta en trabajos de campo. Posteriormente, con la evolución de los equipos electrónicos de medición, ha sido posible relacionar una serie de parámetros subjetivos tales como: inteligibilidad de la palabra, claridad musical, intensidad, reverberación o envolvente espacial del sonido con otros parámetros objetivos obtenidos directamente de mediciones *in situ* como el nivel y la frecuencia¹¹.

2.2 Medición de la intensidad acústica

En base a la propagación de onda, es bastante claro que la energía potencial y cinética creada por el movimiento de una fuente sobre el aire circundante es transportada con el disturbio de éste, y estas energías solo pueden disiparse por la viscosidad del fluido y otros procesos que las transforman en calor. En el proceso de propagación de la onda existen dos parámetros importantes: la presión (incremento y decremento local con respecto a la presión atmosférica) y la velocidad de la partícula del aire oscilante. La intensidad acústica es el producto de la velocidad de la partícula y la presión acústica, es decir, es una medida de la relación de transporte de la suma de las energías cinética y potencial a través de un fluido. Esta cantidad junto con la presión acústica, son útiles en la caracterización de las ondas acústicas.

Un campo acústico, es una región donde existe sonido, y es clasificado de acuerdo a la manera y al ambiente en el cual las ondas se propagan. El término campo libre se describe como un ambiente donde la onda acústica se propaga en un espacio libre de reflexiones, y la relación

entre la presión e intensidad acústica es conocida. Por el contrario, un campo difuso es aquel donde el sonido es reflejado un sinnúmero de veces, produciendo una densidad promedio constante de la energía acústica en cualquier punto del campo. Gade¹² señala que un campo acústico, en el caso general, consiste de una parte activa donde la presión y la velocidad de la partícula están en fase, una parte reactiva donde estas dos cantidades están en cuadratura, y una parte difusa donde las dos cantidades no están correlacionadas.

En 1956, Schultz¹³ implementó; el principio empleado por Bolt y Petrauskas¹⁴, mediante el cual una señal de la velocidad de la partícula puede ser obtenida por la integración de la diferencia entre señales producidas por dos pequeños transductores de presión espaciados una distancia que es función de la longitud de onda de la frecuencia mas alta de interés. Desafortunadamente para el desarrollo de los sistemas de medición, los transductores empleados por Schultz fueron montados back-to-back con sus superficies separadas una pequeña distancia. Esta configuración demanda una extrema circuitería electrónica, y aunque él demostró un funcionamiento satisfactorio bajo condiciones de laboratorio en campos acústicos relativamente simples, los intentos por estudiar el campo acústico generado por una fuente sonora en un enclaustramiento de superficies rígidas fueron insatisfactorios¹⁵.

Contribuciones pioneras en cuanto a la aplicación de las mediciones de intensidad acústica para la determinación de la potencia acústica radiada por fuentes complejas fueron realizadas por Van Zyl, Anderson y Burge^{16, 17}. Aunque ellos usaron una combinación de micrófonos de presión y velocidad en su primer trabajo en trabajos posteriores emplearon la combinación de dos micrófonos de presión nominalmente idénticos, y desarrollaron el primer el primer medidor de intensidad análogo con un amplio intervalo dinámico y de frecuencia¹⁵.

El método ampliamente usado para la medición de intensidad acústica en aire es el método de dos micrófonos, el cual hace uso de dos micrófonos de presión espaciados una pequeña distancia, y su principio de medición descansa en la aproximación de diferencia finita para el gradiente de presión entre los dos micrófonos^{13-15, 20}. El método alternativo "p-u", cual

combina un micrófono de presión con un transductor de la velocidad de la partícula, no ha sido estudiado con detalle debido a la carencia de transductores confiables para la medición de la velocidad de la partícula^{18, 19, 2, 1}. Baker²² desarrolló un sensor de velocidad de alambre caliente, pero con la desventaja de que era un dispositivo de un intervalo de frecuencia limitado. Recientemente, Jacobsen y de Bree^{21, 23} han realizado estudios comparativos entre las sondas p-u y p-p sobre la influencia del error de desfase en la determinación de potencia acústica. En el principio de dos micrófonos, las señales de los dos micrófonos pueden ser procesadas ya sea en el campo del tiempo con filtros análogos o digitales (método directo) o en el campo de la frecuencia usando técnicas digitales (FFT).

En 1975 Fahy¹⁵ concluyó que es posible expresar la intensidad acústica a partir de la parte imaginaria del espectro cruzado de las señales de los dos micrófonos de la sonda de intensidad. Posteriormente Chung²⁴ introdujo una técnica práctica para corregir el desfase entre los canales del sistema de medición de intensidad acústica determinada a partir del espectro cruzado.

Todas las mediciones acústicas están sujetas a errores; de esta manera las fuentes típicas de error son por ejemplo el ruido indeseado, tiempo de promediación insuficiente y calibración inadecuada. En las mediciones de intensidad acústica con la técnica de dos micrófonos los errores predominantes son aquellos relacionados con la aproximación de diferencias finitas usada para la determinación de la velocidad de la partícula, y aquellos dados por la diferencia de la respuesta en fase de los dos canales del sistema de medición. Diferentes autores han trabajado sobre el error de diferencias finitas^{25, 27}, y han establecido que en principio depende del campo acústico y en consecuencia puede conducir a una sobreestimación o subestimación en mediciones discretas de intensidad acústica. Prácticamente se ha demostrado que la separación finita simplemente impone un límite de frecuencia superior que puede ser predicho por la expresión dada para una onda plana con una dirección que coincide con el eje de la sonda de intensidad¹⁵. Esta observación fue reafirmada por un estudio de simulación llevado a cabo por Laville y Nicolas²⁸.

El desfaseamiento es una de las fuentes de error en sondas tipo p-p que tienen una influencia significativa sobre las mediciones de intensidad acústica y en consecuencia sobre la determinación de potencia acústica de fuentes sonoras^{26, 24}. Seybert²⁹ puntualizó que el ruido extraño incrementa el efecto detrimental del error de fase, aunque tuvieron que pasar varios años para que se entendiera la relación entre las condiciones de la superficie de medición de un campo acústico y el error sistemático dado por el desfaseamiento entre los canales del sistema de medición³⁰. Jacobsen^{31, 32} demuestra que el desfaseamiento de un sistema de medición de intensidad acústica depende de una característica del campo acústico llamada índice global presión-intensidad, y que la cantidad que caracteriza al sistema de medición de intensidad acústica es denominado índice de presión-intensidad residual (el cual es una forma de expresar y estimar el error de fase). Así, el desfaseamiento tiene un efecto adverso sobre la exactitud de las mediciones y en consecuencia se ha destinado mucho esfuerzo a mejorar los transductores, y a desarrollar procedimientos de medición que aseguren que dicho parámetro del sistema de medición de intensidad se encuentre dentro de límites aceptables^{35, 36}. Algunos de los métodos para corregir tales errores de fase hacen uso de la "técnica de intercambio", la cual implica que la medición se realice dos veces, la segunda de ellas con los micrófonos intercambiados²⁷, y otro de los métodos hace uso de una calibración inicial donde los dos micrófonos se someten al mismo nivel de presión acústica dentro de un cavidad o acoplador^{32, 36, 37}.

La diversidad de los campos acústicos encontrados prácticamente es enorme; sin embargo ciertas características de estos son generalmente encontradas en el campo cercano de una fuente, en el campo generado por fuentes independientes, y algunas propiedades son un fuerte indicativo de un campo reverberante. La idea en que descansa el concepto del "indicador de campo" es que brinda información acerca de la naturaleza del campo acústico a partir de las mediciones con la sonda de intensidad acústica. El interés en tales parámetros ha crecido en función del desarrollo de las técnicas de medición de intensidad acústica, principalmente por dos razones: (i) la validez de las mediciones de intensidad acústica realizadas con las técnicas actuales depende del campo acústico; y (ii) las mediciones de intensidad acústica proveen información acerca del campo acústico³². Así, los indicadores de campo cumplen dos

propósitos: (i) son útiles para evaluar la confiabilidad de las mediciones de intensidad; y (ii) son de gran utilidad en la interpretación de los campos acústicos. Algunos de los indicadores de campo propuestos por Hübner³⁵, y adoptados por el grupo de trabajo que desarrollo las normas internacionales ISO sobre determinación de potencia acústica pueden ser considerados indicadores cualitativos. Las normas ISO 9614-1³⁶ e ISO 9614-2³⁸ prescriben mediciones iniciales y especifican acciones correctivas sobre la base de ciertos criterios cuando algunos requerimientos no son cubiertos.

La intensidad acústica es útil para mediciones de potencia acústica, identificación y clasificación de fuentes sonoras, visualización de campos acústicos, medición de perdidas por transmisión de particiones e identificación de trayectorias de transmisión, y medición de las propiedades de absorción acústica de materiales y estructuras. Un factor que es común para todas estas aplicaciones de la medición de la intensidad acústica es la determinación de la potencia acústica a través de alguna superficie dentro de un fluido¹⁵, donde se hace necesario determinar el valor de algunos indicadores de campo^{39, 40} para evaluar las mediciones. Las principales fuentes de error en la determinación de potencia por el método de intensidad acústica son la aproximación por diferencias finitas de la velocidad de la partícula y el desfaseamiento entre los canales de medición los cuales afectan las altas y bajas frecuencias, respectivamente⁴¹.

2.3 Aislamiento acústico por la técnica de intensidad acústica

En las siguientes paginas se presentan las investigaciones mas importantes sobre la estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad, entre lo que se destaca las principales variables de medición, y su comparación con los valores obtenidos por la técnica convencional.

La medida convencional del aislamiento acústico de paneles y particiones es la perdida por transmisión (también llamado índice de reducción de ruido), la cual es la relación entre la potencia acústica incidente y transmitida. El método tradicional para la determinación del

índice de reducción de ruido requiere de una cámara de transmisión compuesta de dos cuartos reverberantes aislados estructuralmente. La potencia acústica incidente es determinada a partir de la promediación de los niveles de presión acústica dentro del recinto fuente con el supuesto de que el campo acústico es difuso, y la potencia acústica transmitida es determinada en forma similar además de que el tiempo de reverberación del recinto receptor es determinado.

En 1981, Crocker et al.⁴² comparó los valores del índice de reducción obtenidos por la técnica de intensidad acústica con aquellos dados por el método convencional de paneles simples y compuestos, encontrando una buena concordancia entre los resultados por arriba de la frecuencia de 500 Hz, así como de estos con la ley de masas. Problemas potenciales que encontraron fueron los bajos niveles de presión acústica emitidos por la fuente sonora a altas frecuencias, lo cual conlleva a que se midan muy bajos niveles de intensidad acústica en el recinto receptor y que podrían representar un problema si los niveles de ruido de fondo son equiparables a los niveles de intensidad medidos. Mencionan también que el intervalo de frecuencia de medición es afectado por la distancia de separación entre los micrófonos.

En 1985 Halliwell y Warnock⁶ hacen una comparación del índice de reducción de ruido entre el método convencional y la técnica de intensidad acústica de una pared simple. La muestra es ubicada en cinco posiciones distintas en el túnel formado entre el recinto fuente y receptor, y las mediciones son realizadas para cuatro condiciones de absorción del recinto receptor modificando de esta manera su tiempo de reverberación. A partir de las mediciones encuentran que la condición de mayor material absorbente en el recinto receptor por la técnica de intensidad acústica, y la condición de no-material absorbente con el método convencional son la de mayor concordancia. Asimismo, la técnica de intensidad acústica arroja valores del índice de reducción de ruido mas bajos a bajas frecuencias y más altos a altas frecuencias que el método convencional, lo cual es consistente con lo presentado por otros autores^{43, 44}.

Concluyen también, que el índice de reducción de ruido es mínimo cuando la muestra de prueba es montada en el centro del túnel, y máximo cuando se monta en cualquier extremo de este debido a las propiedades modales del túnel y al acoplamiento con la muestra de prueba⁴³.

La estimación del aislamiento acústico a bajas frecuencias se hace necesaria debido a que actualmente el ruido de tráfico, los equipos utilizados en las viviendas y en actividades industriales y comerciales son fuentes sonoras a bajas frecuencias. A bajas frecuencias, los modos del cuarto y la partición controlan el aislamiento acústico; es decir, los modos resonantes del cuarto son la causa principal de las variaciones del aislamiento acústico cuando una misma partición es medida en diferentes laboratorios⁴⁵. En este sentido, existen diversas líneas de investigación orientadas a la optimización de la medición del aislamiento acústico a bajas frecuencias, y una de ellas es la corrección de Waterhouse⁴⁶.

Por tanto, debido a que en el método convencional es importante medir la energía total en el recinto receptor, la corrección de Waterhouse⁴⁶ debe ser aplicada a los niveles de presión acústica medidos. Una vez que la corrección de Waterhouse es aplicada, la concordancia entre el método convencional y la técnica de intensidad es mucho mejor a bajas frecuencias⁶.

Cops et. al.⁴⁷ estudian la influencia de diferentes parámetros, tales como volúmenes de los cuartos, dimensiones y profundidad del túnel, y el número de posiciones de los micrófonos y la fuente sonora en la determinación del índice de reducción de ruido. El efecto de la profundidad del túnel es observable solamente a frecuencias debajo de la frecuencia de coincidencia (entendida como aquellas frecuencias donde las ondas de flexión de un panel entran en resonancia con las ondas acústicas incidentes. La menor de las frecuencias de coincidencia es la llamada frecuencia crítica) bajo los dos métodos de medición, tal y como se concluye en otros trabajos^{6,43,44}; es decir, el efecto del túnel sobre el aislamiento acústico no depende de los parámetros de la muestra sino de las dimensiones del túnel y de la frecuencia⁴⁷. Concluyen además, a partir de las mediciones con ambos métodos, que el volumen de los cuartos de la cámara de transmisión no tiene efecto alguno sobre los valores del índice de reducción de ruido. Asimismo, se muestra que la desviación estándar de los niveles de presión acústica es mucho menor si se emplea un sistema de micrófono rotativo que posiciones fijas de este, algo similar se encuentra al emplear diferentes posiciones de la fuente sonora en el cuarto transmisor.

Van Zyl y Erasmus⁴⁹, compara los resultados tanto por el método convencional como por la técnica de intensidad acústica en condiciones de altos niveles de flanqueo (entendido). sugieren el concepto de reactividad en la superficie de la muestra de prueba como un indicador de la condición del campo acústico, a partir de la cual es posible determinar la absorción requerida en el cuarto receptor para garantizar mediciones confiables de intensidad acústica. Este concepto es función del área de la muestra de prueba, la absorción del cuarto y la relación de flanqueo (potencia transmitida debida al flanqueo/potencia directa). En 1986, Van Zyl y Erasmus⁵⁰ propusieron una metodología de medición para la técnica de intensidad acústica considerando el error de medición debido al desfaseamiento entre los canales de medición, la reactividad del campo dada por la diferencia entre el nivel de presión e intensidad acústica, el factor de flanqueo, el espaciador para micrófonos, el error por aproximación diferencias finitas y la absorción del cuarto. La utilidad de la corrección de Waterhouse a bajas frecuencias es estudiada también por Van Zyl et. al.⁵¹. En este caso, la corrección de Waterhouse fue aplicada tanto al recinto fuente como al receptor, y para la técnica de intensidad se aplicó solo para el cuarto fuente.

Los efectos del tiempo de reverberación en el cuarto receptor, a partir de seis diferentes condiciones de reverberación a la frecuencia de 500 Hz, sobre las mediciones del índice de reducción de ruido usando la técnica de intensidad acústica fueron investigados por Lai y Qi⁵². En el trabajo se concluye que las mediciones de intensidad acústica no se ven afectadas por las condiciones de reverberación siempre y cuando el índice presión-intensidad de las mediciones no exceda la capacidad dinámica del sistema de medición. Además, se encontró que el índice presión-intensidad puede ser reducido por el incremento de la distancia muestra-sonda o reduciendo el tiempo de reverberación en el cuarto receptor. Asimismo, un indicador global basado en el índice presión-intensidad es formulado como indicativo del grado de concordancia entre los valores de las pérdidas por transmisión determinadas por el método convencional y la técnica de intensidad acústica.

Hongisto et.al.⁵ encuentran que es posible medir valores considerablemente mas altos del índice de reducción de ruido al adicionar material absorbente al cuarto receptor con la técnica de intensidad acústica en comparación al método convencional.

La aproximación clásica de la transmisión acústica de un panel finito se obtiene aplicarlo un factor de corrección a la expresión para paneles infinitos a fin de obtener concordancia con IQS trabajos experimentales. La primera aproximación experimental que toma en cuenta las dimensiones del panel es aquella basada en el estudio de Maidanik⁵³, quien demostró que aunque la coincidencia no puede ocurrir debajo de la frecuencia crítica, existe aún una contribución de transmisión de resonancia debida a los efectos de los extremos y a la transmisión forzada. Generalmente, la transmisión forzada es dominante a bajas frecuencias mientras que la transmisión de resonancia es dominante hasta la frecuencia coincidente o critica. De esta manera, el índice de reducción de ruido a bajas frecuencias decrece con el incremento del área, y de manera contraria para altas frecuencias. Arriba de la frecuencia de coincidencia, las pérdidas por transmisión son independientes del tamaño de la muestra.

Michelsen⁵⁴ soporta experimentalmente que el índice de reducción de ruido disminuye con el incremento de las dimensiones del panel, y arriba de la frecuencia de coincidencia el efecto de las dimensiones del panel son insignificantes. Guy et. al.⁵⁵ encuentran que para muestras simples debajo de la frecuencia de corte del recinto (para un cuarto reverberante se entiende como aquella frecuencia donde deja de cumplirse la condición de campo difuso), los valores de las pérdidas por transmisión generalmente se incrementan con el aumento del tamaño del panel. Generalizaciones para la muestra compuesta fueron mas difíciles de hacer debido a la aparición de resonancias en la muestra pequeña. Entre la frecuencia de corte del cuarto y la frecuencia crítica del panel, el panel mas pequeño tiende a dar valores del índice de reducción de ruido mas altos tanto en muestras simples como compuestas. Encontraron además para muestras simples y compuestas, que la profundidad de la curva en la frecuencia critica depende del tamaño del panel e incrementa con el aumento del área del panel lo cual lo explican con el hecho de que los paneles pequeños pueden absorber gran proporción de la energía cinética del panel y por tanto vibran menos. Arriba de la frecuencia crítica, una

variación considerable en las pérdidas por transmisión en función de tamaño del panel fue observada.

Recientemente Machimbarrena y Jacobsen⁵⁶ mostraron que la diferencia entre el método de presión e intensidad acústica para la determinación del índice de reducción de ruido puede ser menor a 1 dB en el intervalo de frecuencia de 50 Hz a 10 kHz, esto con base a la investigación desarrollada por Jacobsen et al.⁵⁷ en mediciones de intensidad acústica a altas frecuencias. Esto presupone que las mediciones fueron realizadas en cuartos bastante grandes usando un sistema de medición que permite medir intensidad acústica con una exactitud aceptable en un amplio intervalo de frecuencia^{58, 59}.

Hongisto et al.⁴ desarrollan un procedimiento de medición del aislamiento acústico basado en la norma internacional ISO 140-3⁶⁰ e ISO 9614-1⁷. Incluyen una relación de flanqueo que es función del coeficiente de absorción y área de la muestra, así como de la absorción del recinto receptor, para mantener la exactitud dentro de los límites deseados. El indicador de no uniformidad del campo acústico F_4 , mencionado en la norma ISO 9614-1⁷, se incrementa cuando aumentan las fugas. La determinación del indicador de campo presión-intensidad es expresada en función de la relación de flanqueo, el tiempo de reverberación del cuarto receptor, el área de la muestra, efectos del campo cercano geométrico y del índice presión intensidad residual⁵.

La incertidumbre de la medición del índice de reducción de ruido, determinado conforme a ISO 140-3, es presentado en la norma ISO 140-2⁶¹. Los valores de reproducibilidad entre diferentes laboratorios son esperados entre 2,5 dB a 9 dB dependiendo de la frecuencia, y los valores de repetibilidad para un mismo laboratorio se esperan sean entre 1,5 dB y 4,5 dB. Recientemente, los resultados de una prueba *round robin* extensiva fue reportada por Fausti et al.⁶², aunque ya anteriormente se habían realizado estudios de reproducibilidad en pruebas *round robin*⁶³. A partir de 24 laboratorios, se encontró que la reproducibilidad es considerablemente más alta a partir de la frecuencia de 315 Hz que lo mencionado por ISO 140-2⁶².

Posteriormente, Smit et al.⁶⁴ sugirieron que el material de recubrimiento de la apertura de prueba fue probablemente el principal factor de los altos valores de reproducibilidad encontrados por Fausti et al.⁶². Los laboratorios con el marco de montaje de la muestra de madera o metal obtuvieron, en promedio, valores del índice de reducción de ruido más bajos que aquellos laboratorios con marcos de montaje de concreto. Sin embargo, la exclusión de los laboratorios con marcos de montaje diferentes al concreto de los cálculos estadísticos no disminuyó significativamente los valores de reproducibilidad. A partir de lo cual se sugirió que los marcos de montaje de las particiones durante las mediciones en los laboratorios deberían ser estandarizados.

La primera norma internacional de medición en acústica de construcción empleando el método de intensidad acústica fue publicada en 1995 como ISQ 140-5 Anexo E, como una herramienta suplementaria para mediciones de fachadas. El método de laboratorio por la técnica de intensidad para determinación del índice de reducción de ruido ISO 15186-1 fue publicado en 1998⁸.

3. TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO

En base a la definición de intensidad acústica, dada por el producto de la presión y la velocidad de la partícula, es necesario emplear al menos dos transductores para determinar su valor. Un sistema de medición de intensidad acústica se compone de un par de transductores que están físicamente asociados en lo que se llama sonda de intensidad. Existen dos categorías de estos equipos en el mercado: (i) una combina un transductor de presión acústica con una unidad de transducción de la velocidad de la partícula, la cual es llamada sonda p-u; y (ii) la otra está compuesta por dos transductores de presión con la misma respuesta en frecuencia (magnitud y fase), y componen lo que se llama sonda p-p o sonda de dos micrófonos. Este tipo de sondas de intensidad son las más ampliamente usadas en las diferentes aplicaciones de la intensidad acústica, y es la que se empleó en el trabajo experimental del presente trabajo.

En este apartado se describe el principio y errores de medición de las sondas tipo p-p; así como los diferentes indicadores de campo empleados para evaluar la confiabilidad de las mediciones de intensidad e interpretar los campos acústicos. Esto en función de que las mediciones de intensidad acústica dependen de las condiciones de los campos acústicos presentes (la relación entre la presión e intensidad acústica depende del tipo de campo acústico). En este apartado se presentan también algunos conceptos importantes de los campos acústicos reverberantes y anecoicos; así como la teoría del aislamiento acústico y los métodos de medición del índice de reducción de ruido bajo el método de presión e intensidad acústica.

3.1 Principios de medición de intensidad acústica

Por definición, el vector intensidad o vector del flujo de energía es una cantidad que caracteriza el flujo de potencia en una cierta posición. Así, la potencia acústica promedio generada dentro de un volumen es igual a la integral sobre la superficie S del volumen de la componente normal de la intensidad promedio.

que pasa a través de una superficie S está dada por la relación fundamental del concepto de intensidad acústica

$$P_a = \iint_S \vec{I} \cdot d\vec{S} = \iint_S I_n dS \quad (3.1)$$

Esta relación se obtiene a partir del concepto de intensidad, e I_n es la componente del vector normal a la superficie. En un medio sin flujo, el vector intensidad (flujo de potencia por unidad de área, generado por el movimiento de onda) es igual al producto promedio de la presión acústica instantánea y la correspondiente velocidad de la partícula en la misma ubicación^{65,66}:

$$\vec{I} = l \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t) \vec{u}(t) dt \quad (3.2)$$

Esta cantidad expresa la magnitud y dirección del flujo de energía acústica instantánea por unidad de área. Por lo tanto, la componente del vector intensidad en una dirección dada es

$$I_r = l \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t) u_r(t) dt = \overline{p(t) u_r(t)} \quad (3.3)$$

La relación entre la presión y velocidad de la partícula instantánea en un campo de onda plana, está dado por la solución general de la ecuación de onda homogénea en una dimensión, de la forma

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (3.4)$$

donde su solución general es

$$p(x, t) = f(ct - x) + g(ct + x) \quad (3.5)$$

donde f y g son funciones que dependen de las condiciones de frontera espaciales y temporales, la cuales representan disturbios que viajan a la velocidad c en las dirección x positiva y x negativa.

La distribución asociada de la velocidad de la partícula puede ser obtenida aplicando la ecuación de momento¹⁵ a la ecuación (3.5)

$$u(x, t) = \frac{1}{\rho_0 c} f(ct - x) - \frac{1}{\rho_0 c} g(ct + x) \quad (3.6)$$

donde $\rho_0 c$ es llamada impedancia acústica característica del fluido.

Así la relación entre presión y velocidad de la partícula está dada por

$$u^+ = \frac{p^+}{\rho_0 c} \quad \text{y} \quad u^- = -\frac{p^-}{\rho_0 c} \quad (3.6)$$

Donde el signo se refiere a la dirección de propagación x -positiva y negativa. Por tanto, a partir de la ecuación de la relación del trabajo por unidad de área¹⁵, la intensidad acústica instantánea es

$$I(t) = \frac{\left[(p^+)^2 - (p^-)^2 \right]}{\rho_0 c} \quad (3.7)$$

En la cual la dependencia de la presión con respecto a x y t está implícita. La ecuación (3.7) puede ser usada para calcular el valor promedio de \bar{I} en un campo estacionario, sustituyendo las presiones instantáneas por las presiones promedio.

En determinados puntos y tiempos, las presiones componentes de la onda serán del mismo signo y magnitud semejante, y la en consecuencia la velocidad de la partícula será pequeña; alternativamente, las presiones pueden ser de magnitudes similares pero de signo opuesto, y la presión total será pequeña mientras la velocidad de la partícula será grande. En conclusión, en alguna región existe un intercambio continuo entre la energía cinética y potencial, en el cual puede haber sobrepuesto un flujo de energía promedio a través de la región¹⁵. De esta manera, para una onda plana progresiva representada por $p(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \phi)$, la intensidad instantánea a partir de la ecuación (3.7) es

$$\bar{I}(x, t) = \left[\frac{A^2}{\rho_0 c} \right] \cos^2(\omega t - kx + \phi) \quad (3.8)$$

De donde la intensidad promedio es $\bar{I} = \frac{1}{2} \left[A^2 / \rho_0 c \right]$.

Para una onda estacionaria, donde la presión toma la forma $p(x, t) = 2A \cos(\omega t + \phi_1) \cos(kx + \phi_2)$, la distribución de la intensidad está dada por

$$I(x, t) = \left[\frac{A^2}{\rho_0 c} \right] \left[\text{seno}(2\omega t + 2\phi_1) \text{seno}(2kx + 2\phi_2) \right] \quad (3.9)$$

La intensidad instantánea expresada por la ecuación (3.9) representa un flujo de energía acústica puramente oscilatorio entre concentraciones alternantes de energía cinética y potencial.

En cualquier campo acústico, excepto el caso especial de la onda plana progresiva, la intensidad instantánea puede ser dividida en dos componentes: (i) una componente *activa*, que corresponde al transporte neto de energía acústica; y (ii) una componente *reactiva*, correspondiente al transporte de energía oscilatorio. En cualquier frecuencia, estas dos componentes de la intensidad están asociadas con la relación entre la velocidad de la partícula y la presión, estando en fase en un campo activo y en cuadratura en un campo reactivo.

Para identificar la componente activa y reactiva de la intensidad en una dimensión, representamos la presión por $p(x, t) = P(x)e^{i(\omega t + \phi_p(x))}$, en la cual $P(x)$ es la amplitud y $\phi_p(x)$ es la fase. La componente de la velocidad de la partícula en fase con la presión está asociada con la componente activa de la intensidad

$$\bar{I}_a(x, t) = -\frac{1}{\omega\rho_0} \left[P^2 \frac{d\phi_p}{dx} \right] \cos^2(\omega t + \phi_p) \quad (3.10)$$

Donde el valor promedio es

$$\bar{I}_a(x) = -\frac{1}{2\omega\rho_0} \left[P^2 \frac{d\phi_p}{dx} \right] \quad (3.11)$$

Y la componente de la velocidad de la partícula en cuadratura con la presión está asociada con la componente reactiva de la intensidad

$$\bar{I}_{re}(x, t) = -\frac{1}{4\omega\rho_0} \left[\frac{dP^2}{dx} \right] \text{sen}2(\omega t + \phi_p) \quad (3.12)$$

Como se puede observar de las ecuaciones (3.10) y (3.12), la componente activa de la intensidad es proporcional al gradiente de fase espacial, y la componente reactiva es proporcional al gradiente espacial de la presión promedio.

La intensidad total instantánea dada por la suma de las ecuaciones (3.10) y (3.12) puede escribirse como¹⁵

$$\bar{I}(x, t) = \bar{I}_a(x)[1 + \cos 2(\omega t + \phi_p)] + \bar{I}_{re}(x)\text{sen}2(\omega t + \phi_p) \quad (3.13)$$

En la cual \bar{I}_a está dada por la ecuación (3.11), y la componente reactiva es

$$\bar{I}_{re}(x) = -\frac{1}{4\omega\rho_0} \frac{dP^2}{dx} \quad (3.14)$$

donde

$$p(x,t) = P(x)e^{i\phi_p(x)}e^{i\omega t} \quad (3.15)$$

Una forma más compacta de la ecuación (3.13) es

$$\bar{I}(x,t) = \text{Re}\left\{C(x)\left[1 + e^{-2i(\omega t + \phi_p)}\right]\right\} \quad (3.16)$$

Donde $C(x)$, que es conocida como la intensidad compleja, está definida como

$$\begin{aligned} \bar{C}(x) &= \bar{I}_a(x) + i\bar{I}_{re}(x) \\ &= \bar{I}(x) + i\bar{J}(x) \end{aligned} \quad (3.17)$$

La parte real de la intensidad compleja es la intensidad activa promedio, y la parte imaginaria se considera como la amplitud de la intensidad reactiva. A lo largo de este trabajo, \bar{I}_a será empleada como intensidad promedio y se denotará por \bar{I} .

Una expresión más familiar de la intensidad instantánea, considerando que esta dada por el producto de la presión, $p(x,t) = Pe^{i\phi_p}e^{i\omega t}$, y la velocidad de la partícula, $u(x,t) = Ue^{i\phi_u}e^{i\omega t}$, está dada por

$$\bar{I}(x,t) = \text{Re}\left\{\frac{1}{2}PUe^{i\phi_r}\left[1 + e^{-2i(\omega t + \phi_p)}\right]\right\} \quad (3.18)$$

donde $\phi_p - \phi_u$ ha sido sustituido por ϕ_r . Por analogía con la ecuación (3.16), se tiene

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \bar{I} + i\bar{J} = \frac{1}{2}PUe^{i\phi_r} \\ |\bar{C}| &= \frac{1}{2}PU \\ \bar{I} &= \frac{1}{2}PU \cos \phi_r \\ \bar{J} &= \frac{1}{2}PU \sin \phi_r \end{aligned} \quad (3.19)$$

Usando una representación compleja; es decir, $p(x,t) = Pe^{i\omega t}$ y $u(x,t) = Ue^{i\omega t}$, la intensidad compleja queda de la siguiente forma

$$\begin{aligned}
 \bar{C} &= \frac{1}{2} P \bar{U}^* \\
 |\bar{C}| &= \frac{1}{2} |P| |\bar{U}| \\
 \bar{I} &= \frac{1}{2} \text{Re}\{P \bar{U}^*\} \\
 \bar{J} &= \frac{1}{2} \text{Im}\{P \bar{U}^*\}
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

3.1.1 Método basado en el principio p-p

El principio de medición p-p emplea dos micrófonos de presión nominalmente idénticos, donde la velocidad de la partícula en la dirección del eje de la sonda (línea que une los centros acústicos⁶⁷ de la sonda) es obtenida por una aproximación de diferencia-finita del gradiente de presión usando la ecuación de movimiento de Euler, y la presión acústica es simplemente el promedio de las dos señales de los micrófonos. Las principales limitaciones de esta técnica de medición son debidas a la aproximación de diferencia finita, dispersión y difracción, y el desfaseamiento de la instrumentación. La exactitud de la aproximación de diferencia-finita y el efecto de dispersión y difracción obviamente depende de la geometría del arreglo de los micrófonos de la sonda²¹. Varias configuraciones son posibles (figura 1), pero a inicios de la década de 1980 fue mostrado experimentalmente que la configuración *face-to-face* con un espaciador sólido entre los dos micrófonos es particularmente favorable⁶⁸.

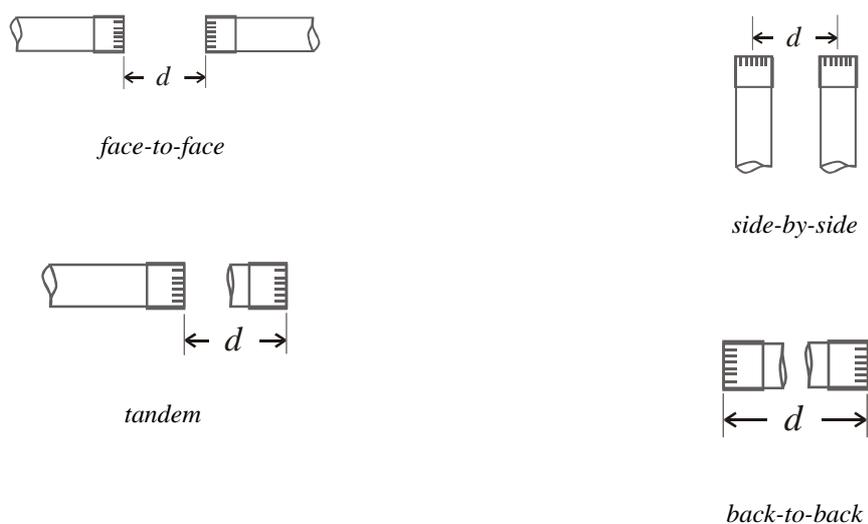


Figura 1. Arreglos de los micrófonos de la sonda de intensidad

La principal desventaja de la configuración *face-to-face* es que los ángulos de incidencia son diferentes para los dos micrófonos: 0° para el segundo micrófono, y 180° para el primero. Esto produce efectos de dispersión diferentes para cada micrófono, los cuales son eliminados insertando un espaciador sólido entre los dos micrófonos, permitiendo de esta manera que las ondas acústicas fuesen detectadas solamente alrededor de la circunferencia de la rejilla de los micrófonos⁶⁹.

La ecuación de momento del flujo promedio del fluido¹⁵ muestra que en un campo acústico de pequeña amplitud, la componente del gradiente de presión en una dirección n es proporcional a la componente de aceleración del fluido en esa dirección

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_0 \frac{\partial u_n}{\partial t} \quad (3.21)$$

Entonces, la componente de la velocidad de la partícula está dada por la integral

$$\begin{aligned} u_n(t) &= -\frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t \frac{\partial p(\tau)}{\partial n} d\tau \\ &\approx \frac{1}{\rho_0 d} \int_{-\infty}^t [p_1(\tau) - p_2(\tau)] d\tau \end{aligned} \quad (3.22)$$

Donde d es la distancia entre los centros acústicos de los micrófonos. En este sentido, la presión en el punto medio entre los transductores es aproximada como

$$p(t) \approx \frac{1}{2} [p_1(t) + p_2(t)] \quad (3.23)$$

De donde la intensidad instantánea es aproximada por

$$I_n(t) \approx \frac{1}{2\rho_0 d} [p_1(t) + p_2(t)] \int_{-\infty}^t [p_1(\tau) - p_2(\tau)] d\tau \quad (3.24)$$

En el caso de señales estacionarias, consideremos dos señales $x(t)$ y $y(t)$ tal que $x(dx/dt) = y(dy/dt) = 0$, y $x(dy/dx) = -y(dx/dt)$, y 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

$$\bar{I}_n = -\frac{1}{\rho_0 \Delta r} \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T \left[p_1(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] dt \quad (3.25)$$

Por tanto, en principio, la intensidad promedio en un campo acústico estacionario puede ser obtenida del producto de la señal de un transductor de presión y la señal integrada de otro transductor idéntico muy próximo.

La expresión relevante para campos armónicos está dada por la ecuación (3.13), donde si a tales fluctuaciones armónicas están sujetas a un análisis de Fourier, la intensidad activa producirá una componente d.c. de magnitud $|\bar{I}_a|$, además de una componente armónica de amplitud $|\bar{I}_a|$ a la frecuencia 2ω . La intensidad reactiva también producirá una componente armónica de amplitud $|\bar{J}|$ a la frecuencia de 2ω , en cuadratura con la componente activa.

Así, por definición, la componente del vector de intensidad promedio en alguna dirección es igual al producto promedio de la presión y la velocidad de la partícula en esa dirección. Por tanto, para sondas p-p la distribución en frecuencia de la intensidad promedio puede ser determinada de acuerdo a la ecuación (3.24) pasando las dos señales a través de dos filtros idénticos, ya sea antes o después de realizar las diferentes operaciones matemáticas, y después de ello obtener el promedio del producto de las salidas filtradas. En el caso de señales estacionarias, la ecuación (3.25) puede ser implementada. Estos procedimientos es lo que se conoce análisis de frecuencia directa.

El procedimiento indirecto de análisis en frecuencia está basado en un análisis de Fourier (espectral) de las dos señales de la sonda, el cual es introducido por la función correlación que indica la relación promedio entre las dos señales en el campo del tiempo. El análisis espectral de las señales de una sonda tipo p-p es como a continuación se muestra.

La componente de intensidad en la dirección del eje de la sonda está dado por la ecuación (3.25)

$$I_r = -\frac{1}{\rho_0 d} \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T p_1(t) \left[\int_{-\infty}^t p_2(\tau') d\tau' \right] dt \quad (3.26)$$

En la cual τ ha sido reemplazada por τ' para evitar confusión con el retraso de la correlación. Escribiendo $\int p_2(\tau') d\tau'$ como $z_2(t)$, la función apropiada de correlación cruzada es

$$R_{pz}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_{-\infty}^T p_1(t) z_2(t + \tau) dt \quad (3.27)$$

Y la correspondiente función de densidad espectral es

$$S_{pz}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} R_{pz}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (3.28)$$

Reescribiendo $e^{-i\omega\tau}$ como $e^{-i\omega(t+\tau)+i\omega t}$, y $d\tau$ como $d(t + \tau)$ para un t fija, la ecuación (3.28) queda de la siguiente manera

$$S_{pz}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p_1(t) z_2(t + \tau) dt \right] e^{-i\omega(t+\tau)} e^{i\omega t} d(t + \tau) \quad (3.29)$$

Considerando primero la integral con respecto a $t + \tau$ manteniendo t fija, y haciendo $dz_2/d(t + \tau) = p_2(t + \tau)$, la ecuación (3.29) queda de la siguiente forma

$$\begin{aligned} S_{pz}(\omega) &= -\frac{i}{2\pi\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p_1(t) p_2(t + \tau) dt \right] e^{-i\omega\tau} d\tau \\ &= -\frac{i}{2\pi\omega} \int_{-\infty}^{\infty} R_{p_1 p_2}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \\ &= -\frac{i}{\omega} S_{p_1 p_2}(\omega) \end{aligned} \quad (3.30)$$

Por lo tanto

$$\operatorname{Re}\{S_{pz}(\omega)\} = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}\{S_{p_1 p_2}(\omega)\} \quad (3.31)$$

y

$$\begin{aligned} I_r(\omega) &= -\frac{2}{\rho_0 \omega d} \operatorname{Im}\{S_{p_1 p_2}(\omega)\} \\ &= \frac{1}{\rho_0 \omega d} \operatorname{Im}\{G_{p_2 p_1}(\omega)\} \end{aligned} \quad (3.32)$$

La ecuación (3.32) es la forma espectral (intensidad acústica en el campo de la frecuencia) de la ecuación (3.25).

3.1.2 Errores de medición en la técnica de intensidad acústica

Las mediciones de intensidad acústica están sujetas a errores asociados con los siguientes factores: (i) aproximaciones hechas en las relaciones asumidas entre las señales registradas y la intensidad, (ii) imperfecciones de la sonda de intensidad, (iii) imperfecciones en el procesamiento de las señales para la estimación de la intensidad acústica, (iv) errores de calibración, (v) ruido producido por disturbios no-acústicos y el instrumento mismo, y (vi) errores asociados al tiempo de promediación usado en la estimación espectral. Una parte considerable de la literatura ha sido dedicada a la identificación y estudio de los errores fundamentales y a aquellos asociados con las deficiencias de la técnica^{12,17,21,23-25,31-34}.

Las dos principales limitaciones del método de medición p-p son: (i) aproximación por diferencia-finita, y (ii) desfaseamiento de la instrumentación. En principio, el error inherente asociado con la diferencia-finita entre los dos micrófonos depende del campo acústico^{25,26} debido a la definición del cálculo de la velocidad de la partícula, e impone prácticamente un límite de frecuencia superior. En contraste, el error debido a las diferencias de respuesta en fase entre los micrófonos depende fuertemente del campo acústico, debido a que el desfaseamiento del equipo de medición impondrá límites de uso dependiendo del tipo de campo acústico. El error de una medición de intensidad acústica es grande a menos que $\varphi_e \ll \Delta\varphi$, donde $\Delta\varphi$ es el ángulo de fase entre las presiones y φ_e es el error de fase, donde esta condición impone restricciones sobre el intervalo de medición incluso usando sondas de intensidad que cumplen los requerimientos especificados en la norma IEC 61043⁵⁹.

A continuación se hace una descripción de los errores intrínsecos de la técnica p-p, por diferencia-finita y el error por desfaseamiento del equipo de medición. Respectivamente, estos errores surgen de las aproximaciones dadas por las ecuaciones (3.22) y (3.23).

3.1.2.1 Aproximación por diferencia-finita

Como fue mencionado, los errores inherentes en la aplicación de la técnica p-p derivan de las aproximaciones de diferencia-finita a la presión y la componente axial de la velocidad de la partícula expresados por las ecuaciones (3.22) y (3.23). La estimación de la intensidad acústica a partir de la aproximación por diferencia-finita de la velocidad de la partícula dada por la

ecuación (3.24) es de una exactitud aceptable solamente si la distancia entre los micrófonos es mucho menor que la longitud de onda, como se sugiere en la figura 2, y esto claramente implica un límite de frecuencia superior que es inversamente proporcional a la distancia entre los micrófonos.

El error puede ser expresado en términos de una expansión de series de Taylor de un campo acústico. Para una sonda de intensidad ideal en una onda plana de incidencia axial (propagación en la dirección de la línea que une ambos micrófonos), el error de diferencia-finita (la relación entre la intensidad medida \hat{I}_r y la intensidad verdadera I_r) a partir de la ecuación (3.32) puede ser expresado de la siguiente manera

$$\frac{\hat{I}_r}{I_r} = \frac{p^2 \text{sen}(k\Delta r) / k\rho c\Delta r}{p^2 / \rho c} = \frac{\text{sen}k\Delta r}{k\Delta r} \quad (3.33)$$

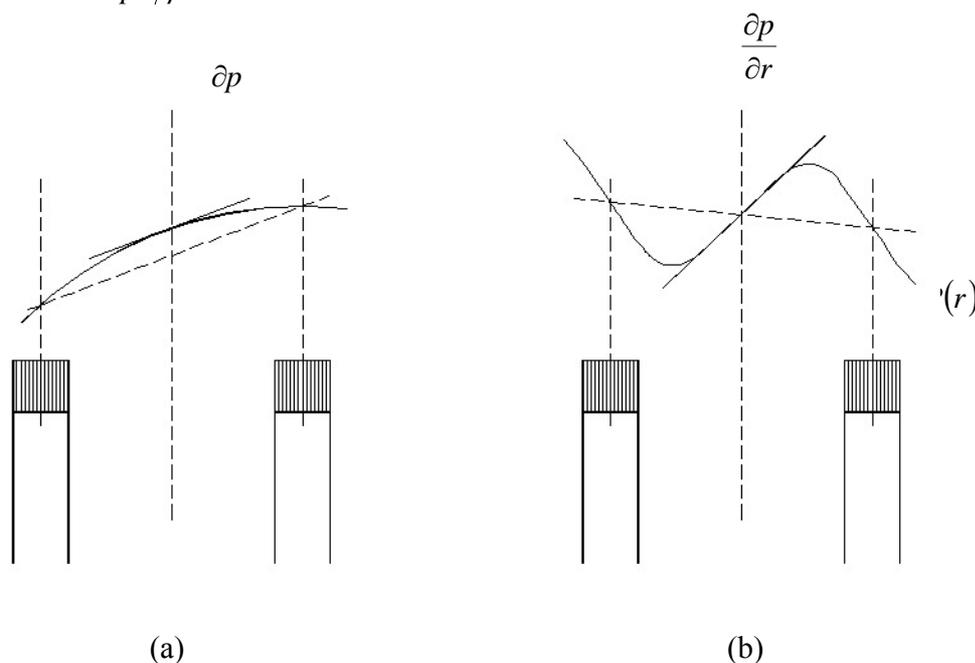


Figura 2. Ilustración del error debido a la aproximación por diferencia-finita: (a) buena aproximación a bajas frecuencias, (b) muy pobre aproximación a altas frecuencias

Al graficar para diferentes distancias entre micrófonos la ecuación (3.33) se obtiene el límite de frecuencia superior (aparentemente la intensidad es subestimada) generalmente considerado la frecuencia a la cual el error por aproximación de diferencia-finita es pequeño¹⁵. Experimentalmente se ha mostrado que la separación finita simplemente impone un límite de

frecuencia superior en la determinación de potencia acústica de fuentes sonoras. La condición $k\Delta r < 1,2$, ($k\Delta r$ es en realidad la diferencia en fase entre las dos posiciones de los micrófonos en una onda plana senoidal donde la sonda es orientada en la dirección de propagación) asegura que el error debido a la aproximación por diferencia-finita sea menor a 1 dB en un campo acústico de una dimensión¹⁵. Esto implica, por ejemplo, que mediciones de intensidad acústica con un espaciador de 12 mm pueden ser de exactitud aceptable hasta la frecuencia de 5 kHz, debido a que esta parece ser la distancia mínima en la cual los errores por difracción son bastante pequeños con micrófonos de condensador de ½ pulgada.

De acuerdo a Pavić²⁶, una distancia a la fuente $r > \lambda/7$ asegura que la exactitud sea al menos igual que en campo lejano para fuentes monopolo. No es posible corregir el error de diferencia finita en mediciones prácticas; sin embargo, la experiencia parece mostrar que si se excluyen mediciones muy próximas a fuentes puntuales, la ecuación para el error bajo condiciones de onda plana brinda al menos una indicación general de la exactitud de la medición⁶⁵.

Un reciente estudio numérico y experimental, acerca de la interferencia de los micrófonos sobre el campo acústico, ha mostrado que el límite de frecuencia superior de una sonda de intensidad tipo p-p y configuración *face-to-face* es una octava arriba de lo predecido por el error de diferencia-finita. En este estudio se considera la longitud del espaciador igual al diámetro de los micrófonos, debido a que la resonancia de las cavidades frente a los micrófonos origina un incremento de la presión que en cierto grado compensa el error por diferencia finita⁵⁷.

3.1.2.2 Desfasamiento de la instrumentación

El desfasamiento entre los canales de medición es la fuente de error más importante en las mediciones de intensidad acústica por la técnica p-p. La discrepancia en fase entre los micrófonos es el parámetro más crítico especialmente a bajas frecuencias y en campo altamente reactivos. Es bien sabido que pequeñas desviaciones de la respuesta en fase de los dos micrófonos tienen un efecto adverso sobre la exactitud de la medición, por lo que diferentes investigaciones han sido enfocadas al mejoramiento de los transductores³³ y al

desarrollo de procedimientos que aseguren que el desfaseamiento está dentro de límites aceptables^{7,34}.

A partir de la ecuación (3.33) es aparente que para frecuencias donde $\lambda < \Delta r$ (longitudes de onda cortas comparadas al espaciamiento) un error grande puede ser introducido, basados sobre la aproximación de diferencia finita y el espaciamiento entre micrófonos. Viceversa, el error de diferencia finita es más pequeño conforme la frecuencia disminuye y teóricamente se aproxima a cero cuando la frecuencia se aproxima a cero. A bajas frecuencias, sin embargo, la diferencia de fase física entre las dos señales de los micrófonos es muy pequeña y puede eventualmente alcanzar el orden de magnitud de la exactitud de la medición. Este tipo de error es conocido como el desfaseamiento de la instrumentación o del sistema de medición de intensidad acústica.

La relación entre la presión promedio y la componente de intensidad en la dirección del eje de la sonda p-p está dada por la ecuación (3.25) para el caso de señales armónicas simples ($p_1 = P_1 e^{i(\omega t + \phi_1)}$ y $p_2 = P_2 e^{i(\omega t + \phi_2)}$), con la condición que $P_1 P_2 / 2$ es una buena aproximación de la presión promedio $\overline{p^2}$ en el punto central de los centros acústicos de los dos micrófonos, y que la diferencia de fase del campo $\phi_f = \phi_1 - \phi_2$ (diferencia de fase física) entre estos puntos es mucho menor que la unidad. Asumiendo que la dirección de intensidad positiva es del centro acústico del micrófono 1 al centro acústico del micrófono 2, entonces se puede escribir que

$$I = \frac{\overline{p^2}}{\rho_0 c} \frac{\phi_f}{k \Delta r} \quad (3.34)$$

Donde I es la componente del vector intensidad en la dirección del eje de la sonda. En cualquier frecuencia, el efecto de desfaseamiento entre los canales de medición ϕ_s tendrá un efecto sobre la intensidad medida, esto es

$$I_e = \frac{\overline{p^2}}{\rho_0 c} \frac{(\phi_f + \phi_s)}{k \Delta r} \quad (3.35)$$

Si ϕ_s es de signo opuesto a ϕ_f , la intensidad será subestimada. El error normalizado es

$$e_{\phi}(I) = \frac{I_e - I}{I} \cong \frac{\phi_s}{\phi_f} \cong -\frac{\phi_s}{k\Delta r} \frac{\overline{p^2}}{I\rho_0 c} \quad (3.36)$$

Evidentemente, el desfaseamiento es más crítico para espaciadores pequeños usados entre los micrófonos de la sonda, y para bajas frecuencias. Este tipo de error es el que define el límite de frecuencia inferior de las mediciones de intensidad. Para mantener este error pequeño a bajas frecuencias, se recomienda incrementar el valor de la diferencia de fase física, lo cual corresponde a incrementar el espaciamiento.

Si la sonda p-p es ubicada en un campo acústico donde ambos micrófonos son expuestos a presiones idénticas (magnitud y fase), la intensidad medida es llamada intensidad *residual* I_{res} , la cual es expresada como

$$I_{res} = \left(\frac{\overline{p^2}}{\rho_0 c} \right)_{res} \frac{\phi_s}{k\Delta r} \quad (3.37)$$

Ahora, el error normalizado queda definido de la siguiente manera

$$e_{\phi}(I) = I_{res} \left(\frac{\rho_0 c}{\overline{p^2}} \right)_{res} \frac{\overline{p^2}}{I\rho_0 c} \quad (3.37)$$

Para esta condición acústica, a la diferencia entre el nivel de presión e intensidad acústica se le conoce como *índice presión-intensidad residual* δ_{PI_0} , el cual denota una medida del desfaseamiento del sistema de medición

$$\delta_{PI_0} = 10 \log \left(\frac{\overline{p_{res}^2}}{|\overline{I}_{res}| \rho c} \right) \quad (3.38)$$

y para el caso de una medición práctica, a la diferencia entre en nivel de presión e intensidad acústica se le conoce como *índice presión-intensidad* $\delta_{PI} = L_p - L_I$.

La ecuación (3.37) es principalmente útil cuando el error normalizado es relativamente pequeño. Cuando el desfaseamiento y la diferencia de fase del campo acústico son del mismo

orden, el valor práctico de la medición sin corrección depende fuertemente del signo del error de fase.

El propósito en que descansa la aproximación adoptada en la norma ISO 9614-1⁷ sobre determinación de potencia acústica es asegurar que los errores de desfaseamiento se encuentren dentro de límites aceptables cuando se encuentran ciertos requerimientos, e indicar acciones a tomar para mejorar la situación cuando esto no se cumple. Una aproximación alternativa es corregir estos errores de desfaseamiento de la instrumentación, previa estimación del índice presión-intensidad residual. De la ecuación (3.35) y (3.37), la intensidad corregida I_c es

$$I_c = I_e - I_{res} \left(\frac{\overline{p^2}}{p_{res}^2} \right) \quad (3.38)$$

Uno de los métodos para determinar el desfaseamiento de una sonda p-p emplea una pequeña cavidad donde los micrófonos deben ser sometidos a los mismos niveles de presión acústica en un amplio intervalo de frecuencia^{15,32,36,37,70,71}. Otra aproximación es usando actuadores electrostáticos^{37,72}, el cual parece ser problemático a bajas frecuencias, aunque el combinar el método del acoplador y el actuador electrostático parece ser ventajoso.

La literatura sobre intensidad acústica no es muy clara sobre el tema de la corrección de errores debido al desfaseamiento, Jacobsen⁷² realiza una breve discusión alrededor de este tema.

3.1.3 Indicadores de campo

Las mediciones de intensidad acústica pueden ser usadas para clasificar y caracterizar campos acústicos en términos cuantitativos, con énfasis particular sobre el significado y aplicación de *indicadores de campo*. Los campos acústicos son determinados por la naturaleza, forma y ubicación de los mecanismos de generación de sonido, forma y propiedades de las fronteras del medio, y cualquier variación de la velocidad del sonido dentro del medio. Con el objeto de discutir las características energéticas de los campos acústicos es útil clasificar formas y regiones de estos en base a descripciones cualitativas. Las mediciones de intensidad acústica con una sonda p-p pueden producir una caracterización más comprensiva de un campo

acústico debido a que la relación entre la presión acústica y la velocidad de la partícula es un fuerte indicativo de la naturaleza del campo.

En cualquier punto en la proximidad de una fuente sonora (primaria), el campo acústico total puede ser descompuesto en tres componentes: (i) el campo directamente radiado por la fuente primaria; (ii) los campos radiados de otras fuentes presentes; (iii) el campo producido por reflexión, dispersión y difracción, el cual es radiado por diferentes cuerpos y superficies. De la misma manera, el campo directo puede ser dividido en tres regiones: (i) el campo cercano hidrodinámico, en el cual la presión acústica y la velocidad de la partícula están cercanamente en cuadratura, esto es $|u| \gg |p|/\rho_0 c$, los gradientes de presión y por tanto la intensidad reactiva son fuertes con respecto a la intensidad activa, y el índice presión-intensidad es alto; (ii) el campo cercano geométrico, en el cual la presión acústica no varía inversamente con la distancia desde la fuente y el ángulo de fase entre la presión y la velocidad de la partícula puede ser bastante pequeño (la relación entre estos parámetros es una función compleja de la posición); (iii) el campo lejano, en el cual la presión y la velocidad de la partícula están en fase¹⁵.

Aunque es imposible hacer una generalización del índice presión-intensidad en el campo cercano geométrico, es claro que este parámetro tendrá un valor positivo, y en ocasiones bastante grande. Conforme la distancia de medición desde la fuente se incrementa, δ_{PI} disminuirá para mediciones de intensidad radialmente dirigidas en la ausencia de fuentes extrañas o superficies reflejantes. En el campo lejano geométrico, bajo condiciones de campo libre, los vectores de la velocidad de la partícula e intensidad acústica están radialmente dirigidos, $I = \overline{p^2}/\rho_0 c$ y $\delta_{PI} = 0$. Donde las mediciones de intensidad acústica son llevadas a cabo en un campo acústico formado por el campo lejano de una fuente primaria y fuentes extrañas no-correlacionadas, δ_{PI} depende de la dirección y magnitud relativa del vector intensidad en el punto de medición.

El material presentado a continuación sobre los indicadores de campo es extraído de los trabajos de Jacobsen^{31,32,72} relacionados al área, quien ha contribuido enormemente en el desarrollo de sondas p-p.

Jacobsen³¹ define el término indicador de campo como una cantidad normalizada que expresa alguna propiedad local o global del campo acústico. El interés en esta cantidad ha crecido debido a dos razones: la validez de las mediciones de intensidad dependen fuertemente del campo acústico; y a contrario, las mediciones de intensidad proveen información acerca del campo acústico. De esta manera, los indicadores de campo tienen dos propósitos: (i) son útiles en evaluar la confiabilidad de las mediciones acústicas; y (ii) son útiles en la interpretación de los datos de los campos acústicos. Los indicadores de campo se pueden dividir en dos grupos: indicadores asociados esencialmente con la exactitud de las mediciones en mediciones discretas y en la determinación de potencia acústica usando intensidad acústica; y los indicadores cuyo propósito principal está en la interpretación de campos acústicos.

Indicadores asociados con la exactitud de la medición

El indicador de campo más conocido es indudablemente el índice presión-intensidad, definido como la diferencia entre el nivel de presión e intensidad acústica

$$\delta_{p|I} = L_p - L_{|I|} - 10 \log \left(\frac{I_0}{p_0^2 / \rho c} \right) \quad (3.39)$$

Donde el último término es una corrección en el aire. La utilidad de esta cantidad está estrechamente conectada con la relación

$$\frac{I_r}{\overline{p^2} / \rho c} = - \frac{\partial \varphi}{\partial r} / k \quad (3.40)$$

la cual muestra que la relación entre la intensidad acústica y la presión promedio es proporcional al gradiente de fase de la presión⁶⁵. A partir de la ecuación (3.40) se encuentra que la diferencia de fase entre las dos señales de presión de la sonda de intensidad es

$$\Delta \varphi \cong \frac{\partial \varphi}{\partial r} \Delta r = - \frac{k \Delta r I_r}{\overline{p^2} / \rho c} \quad (3.41)$$

y de esta forma

$$\delta_{p|I} = 10 \log \left(\frac{\overline{p^2} / \rho c}{I_r} \right) = 10 \log \left(\frac{k}{|\partial \varphi / \partial r|} \right) \quad (3.42)$$

De la ecuación (3.42) se deduce que un valor grande de δ_{pl} es una indicación de un gradiente de fase particularmente pequeño. Es obvio que un desfaseamiento pequeño entre los canales de medición de la sonda pasa a ser importante cuando la diferencia de fase entre las presiones disminuye. La capacidad para medir bajos niveles de intensidad relativos a los niveles de presión acústica puede ser expresada en términos de la capacidad dinámica del equipo^{7,12}, la cual se define como

$$L_d = \delta_{p_0 I_0} - K \quad (3.43)$$

donde el valor de K depende del grado de exactitud requerido. En mediciones discretas $\delta_{p|I}$ no debe exceder L_d para asegurar la exactitud requerida⁷.

El índice presión-intensidad es un indicador de campo local asociado con una posición y dirección particular del campo. Un indicador global asociado con la superficie de medición, usado en la determinación de potencia acústica de fuentes sonora se define como

$$\Delta_{pl} = \bar{L}_p - \bar{L}_I - 10 \log \left(\frac{I_0}{p_0^2 / \rho c} \right) \quad (3.44)$$

donde la presión e intensidad acústica es el promedio de todos los puntos discretos de la superficie de medición. Es aparente que un valor alto de Δ_{pl} puede ser debido a efectos de campo cercano o a una superficie de medición no adecuada. La importancia de Δ_{pl} se debe al hecho de que refleja la influencia del desfaseamiento sobre la medición total, en la misma forma que δ_{pl} refleja la influencia del desfaseamiento sobre mediciones discretas.

Un indicador de campo global relacionado, llamado indicador presión-intensidad superficial, es definido como

$$\Delta_{p|I} = \bar{L}_p - \bar{L}_{|I} - 10 \log \left(\frac{I_0}{p_0^2 / \rho c} \right) \quad (3.45)$$

donde la presión y la intensidad absoluta son promediadas sobre todos los puntos de medición. Este indicador da un promedio de los valores locales del índice presión intensidad $\delta_{p|I}$. Sin embargo, no existe una relación simple entre $\Delta_{p|I}$ y el error total de desfaseamiento: un valor

bajo de $\Delta_{p|I}$ indica que los errores locales debidos al desfaseamiento son moderados. Si el indicador global $\Delta_{p|I}$ es pequeño, entonces los valores locales del indicador $\delta_{p|I}$ son probablemente pequeños en todos los puntos de medición. En condiciones de medición aceptables, no debe existir diferencia entre los indicadores globales $\Delta_{p|I}$ y Δ_{pI} .

Otro indicador global relacionado es

$$\Delta_{|I|I} = \Delta_{pI} - \Delta_{p|I} = \bar{L}_{|I|} - \bar{L}_I \quad (3.46)$$

Este indicador global da una indicación de intensidad negativa, la cual usualmente es causada por fuentes extrañas, aunque esto también puede ocurrir en el campo cercano de una fuente. No obstante, un valor alto de $\Delta_{|I|I}$ es un fuerte indicativo de ruido de fondo no-difuso; es decir, ruido de una fuente ubicada fuera de la superficie de medición, pero próxima de ésta. No existe una relación entre el indicador $\Delta_{|I|I}$ y el efecto de un error de fase; sin embargo, su valor tiene un uso potencial en la interpretación del campo acústico.

Por ejemplo, un valor grande de Δ_{pI} y un valor pequeño de $\Delta_{|I|I}$ implican una modificación de la forma de la superficie de medición para reducir fuertes reflexiones discretas, e incrementar la absorción del cuarto. El procedimiento descrito en la referencia [7] está diseñado para asegurar un cierto grado de exactitud mediante la indicación de ciertas acciones cuando ciertos criterios han sido satisfechos.

Indicadores para análisis de campos acústicos

El análisis de un campo acústico incluye localización de fuentes, detección de áreas con radiación dominante, establecer si el campo acústico es generado por varias fuentes independientes, y determinar la cantidad de sonido reflejado o la presencia de un campo reverberante. Es bastante claro que la parte activa y reactiva de la intensidad acústica son cantidades esenciales en este tipo de análisis.

El índice presión-intensidad $\delta_{p|I}$ es también útil en el análisis de un campo acústico; sin embargo, un valor grande de este indicador puede presentarse en una variedad de condiciones acústicas, por lo que usualmente será necesario suplementarlo con otras mediciones.

La coherencia entre la presión acústica y la velocidad de la partícula es definida como

$$\gamma_{pu_r}^2(\omega) = \frac{|S_{pu_r}(\omega)|^2}{S_{pp}(\omega)S_{u_r u_r}(\omega)} \quad (3.47)$$

donde $S_{pp}(\omega)$, $S_{u_r u_r}(\omega)$ y $S_{pu_r}(\omega)$ son los autoespectros y el espectro cruzado de ambas señales, respectivamente. La utilidad de esta cantidad viene del hecho que un campo acústico generado o dominado por una sola fuente es coherente; es decir, que la presión acústica será completamente coherente con la velocidad de la partícula medida en la misma posición. Por otra parte, la coherencia entre estas dos señales será menor que la unidad en un campo acústico generado por varias fuentes.

La coherencia en bandas de frecuencia es la función de coherencia determinada con una resolución espectral finita, y esta cantidad también ha sido sugerida como un indicador de campo⁷³. Este indicador permite distinguir entre varias condiciones acústicas donde el índice presión-intensidad es alto, lo cual está basado sobre la observación que la coherencia entre presión y la velocidad de la partícula es probable a ser subestimada en un campo reverberante debido a la resolución espectral inadecuada. Variando la resolución espectral es posible determinar si un valor grande de $\delta_{p|u|}$ es el resultado de efectos de campo cercano, fuertes reflexiones o ruido de fondo reverberante^{31,73}. Idealmente, el ancho de banda de la resolución debería ser menor que $2 \cdot 2/T$, donde T es el tiempo de reverberación¹⁵.

En el campo cercano hidrodinámico de una fuente, la presión y la velocidad de la partícula en algún punto están principalmente controladas por la acción de la fuente en la proximidad de aquel punto, por lo que la coherencia pu tiende a la unidad, independientemente de la complejidad del campo. En el campo cercano geométrico, sin embargo, contribuciones significativas a la presión y la velocidad de la partícula son debidas a la región extendida del sistema fuente¹⁵. Por definición, $\delta_{p|u|}$ es mayor que cero en el campo cercano geométrico, completamente coherente o no. En el campo lejano, $p(t) = \rho_0 c \cdot u(t)$, independientemente de la naturaleza de la fuente, la coherencia pu es igual a la unidad. Esto sugiere que el valor de la coherencia entre la presión y la velocidad de la partícula dirigida radialmente del centro de

la fuente puede ser usada como un indicador de la extensión del campo cercano geométrico de un radiador complejo, probando que no existen reflexiones significativas.

3.2 Sonido en recintos

La interferencia entre las repetidas reflexiones del sonido producidas por las fronteras de un recinto que no es altamente absorbente crea un campo acústico complejo, tanto en el tiempo como en el espacio, que exhibe cinco características principales: (i) resonancia asociada con los modos acústicos; (ii) *reverberación* (aproximadamente la densidad de la energía acústica decae exponencialmente una vez apagada la fuente sonora); (iii) modelos convolucionados de flujo de energía; (iv) una tendencia de la uniformidad espacial de la presión promedio; e (v) impredecibilidad. A frecuencias suficientemente altas, y con una fuente con suficiente ancho de banda, los campos acústicos en recintos se aproximan a un modelo ideal conocido como *campo difuso*, en el cual se asume que cada punto recibe ondas planas mutuamente no-correlacionadas con probabilidad de dirección uniforme⁷⁴.

Los modelos teóricos de los campos acústicos en grandes espacios reverberantes forman las bases de métodos normalizados de medición para la determinación de potencia acústica, índice de reducción de ruido de particiones y el coeficiente de absorción acústica de materiales en incidencia aleatoria. El estudio de campos acústicos en espacios cerrados ligeramente amortiguados puede ser aproximado, en al menos, dos formas completamente diferentes. Una de ellas, que es particularmente útil a bajas frecuencias, es resolviendo la ecuación de onda, analíticamente o mediante métodos numéricos, con condiciones de frontera prescritas, conduciendo de esta manera a una descripción en términos de los modos del recinto. Una aproximación alternativa es usar consideraciones estadísticas, la cual tiene la ventaja de no requerir un conocimiento detallado de la geometría del recinto, pero el modelo solo es adecuado para medias y altas frecuencias⁷⁵.

En el presente apartado se muestra el análisis de las características modales de un campo acústico en un recinto rectangular; además, es introducido el concepto de densidad modal, factor de traslape modal y el tiempo de reverberación. Este material es obtenido de la referencia [75].

3.2.1 Frecuencias y modos naturales

El sonido en recintos ligeramente amortiguados resonará a determinadas frecuencias, frecuencias naturales, y el campo acústico en estas frecuencias es llamado modo, y la distribución espacial de la presión acústica es llamada forma modal. Si las pérdidas en las paredes son ignoradas, la ecuación de Helmholtz con condiciones de frontera dadas por las paredes rígidas se convierte en un problema eigenvalor, y su solución matemática a las eigenfunciones y eigenfrecuencias, los cuales son los términos matemáticos para los modos y las frecuencias naturales, respectivamente. Los modos y las frecuencias naturales no pueden ser determinados analíticamente a menos de que el recinto sea de una geometría simple.

Por simplicidad se tratará el caso más simple que es un cuarto rectangular, lo cual se traduce en encontrar soluciones a la ecuación de Helmholtz expresada en el sistema cartesiano como

$$\frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial z^2} + k^2 \hat{p} = 0 \quad (3.48)$$

sujeta a las condiciones frontera de un gradiente de presión normal de cero en las paredes rígidas

$$\frac{\partial \hat{p}}{\partial x} = 0 \text{ en } x = \begin{cases} 0 \\ l_x \end{cases} \quad \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} = 0 \text{ en } y = \begin{cases} 0 \\ l_y \end{cases} \quad \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} = 0 \text{ en } z = \begin{cases} 0 \\ l_z \end{cases} \quad (3.49)$$

Se asume que la solución a la ecuación (3.48) puede ser factorizada; es decir, escrita como el producto de una exponencial compleja y una función de x , y y z

$$\hat{p}(x, y, z, t) = p_x(x)p_y(y)p_z(z) \quad (3.50)$$

Sustituyendo la ecuación (3.50) en la ecuación (3.48), y dividiendo entre \hat{p}

$$\frac{1}{p_x(x)} \frac{d^2 p_x(x)}{dx^2} + \frac{1}{p_y(y)} \frac{d^2 p_y(y)}{dy^2} + \frac{1}{p_z(z)} \frac{d^2 p_z(z)}{dz^2} + k^2 = 0 \quad (3.51)$$

De la ecuación (3.51) puede decirse que todos los términos deben ser independientes de x , y y z . Entonces igualando los primeros tres términos a $-k_x^2$, $-k_y^2$ y $-k_z^2$

$$\begin{aligned}\frac{d^2 p_x(x)}{dx^2} + k_x^2 p_x(x) &= 0 \\ \frac{d^2 p_y(y)}{dy^2} + k_y^2 p_y(y) &= 0 \\ \frac{d^2 p_z(z)}{dz^2} + k_z^2 p_z(z) &= 0\end{aligned}\tag{3.52}$$

Donde las tres constantes tienen la restricción

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2\tag{3.53}$$

Así, la ecuación (3.48) ha sido separada en tres ecuaciones, donde cada una depende solamente de una coordenada. Las tres ecuaciones tienen soluciones de la forma

$$\begin{aligned}p_x(x) &= Ae^{-jk_x x} + Be^{-jk_x x} \\ p_y(y) &= Ce^{-jk_y y} + De^{-jk_y y} \\ p_z(z) &= Ee^{-jk_z z} + Fe^{-jk_z z}\end{aligned}\tag{3.54}$$

Por tanto, la solución general de la ecuación (3.48), la cual debe cumplir las condiciones de fronteras dadas por la ecuación (3.49), es

$$\hat{p} = (Ae^{-jk_x x} + Be^{-jk_x x}) (Ce^{-jk_y y} + De^{-jk_y y}) (Ee^{-jk_z z} + Fe^{-jk_z z}) e^{j\omega t}\tag{3.55}$$

A partir de las condiciones de frontera en $x = 0, y = 0$ y $z = 0$ se observa que $B = A, D = C$ y $F = E$, por tanto

$$p(x) = 2A \cos(k_x x) \quad p(y) = 2C \cos(k_y y) \quad p(z) = 2E \cos(k_z z)\tag{3.56}$$

Las condiciones de frontera en $x = l_x, y = l_y$ y $z = l_z$ se cumplen solamente para los siguientes valores discretos de k_x, k_y y k_z

$$k_x l_x = n_x \pi \quad k_y l_y = n_y \pi \quad k_z l_z = n_z \pi\tag{3.57}$$

donde n_x, n_y y n_z son enteros. De esta manera, la presión acústica es la suma de términos de la forma

$$\psi_N(x, y, z) = \Lambda_N \cos\left(\frac{n_x \pi x}{l_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{l_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{l_z}\right)\tag{3.58}$$

Esto es

$$\hat{p} = (x, y, z, t) = \sum_N A_N \psi_N(x, y, z) e^{j\omega t} \quad (3.59)$$

donde N representa los tres enteros n_x, n_y y n_z

$$\sum_N = \sum_{n_x=0}^{\infty} \sum_{n_y=0}^{\infty} \sum_{n_z=0}^{\infty} \quad (3.60)$$

Las amplitudes modales A_N dependen de la posición y de la cantidad de energía emitida por la fuente. El factor

$$\Lambda_N = \sqrt{\varepsilon_{n_x} \varepsilon_{n_y} \varepsilon_{n_z}} \quad (3.61)$$

En el cual $\varepsilon_0 = 0$ y $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \dots = 2$ es una constante de normalización. Combinando la ecuación (3.53) y (3.57) se obtiene la expresión para las frecuencias naturales del cuarto

$$\omega_N = k_N c = c \left[\left(\frac{n_x \pi}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{l_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{l_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.62)$$

Cada término de la ecuación (3.59) representa un modo. En el caso especial donde los tres índices son cero se tiene el modo fundamental de la cavidad en el cual la presión acústica es independiente de la posición en el cuarto y el aire en el cuarto actúa como un resorte. Si dos de los índices son cero, se tiene lo que se llama *modo axial* con movimiento de onda solo en una dirección; los modos con dos dimensiones, donde un índice es igual a cero, son conocidos como *modos tangenciales*; y los modos en tres dimensiones son denominados *modos oblicuos*.

Los modos en un cuarto pueden ser interpretados como sumas de ondas de interferencia en varias direcciones. Por ejemplo, reescribiendo la expresión para un modo axial en la dirección x como una suma de dos exponenciales complejas

$$\psi_N(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{-jk_x x} + e^{jk_x x}) \quad (3.63)$$

puede considerarse como una suma de dos ondas planas con la misma amplitud, una de las cuales viajando en la dirección x positiva y la otra en la dirección opuesta (onda estacionaria). Las ondas interfieren de tal manera que se cumplen las condiciones de frontera $x = 0$ y $x = l_x$,

lo cual es válido para valores discretos k_x dado por la ecuación (3.57). La expresión general del modo en tres dimensiones queda de la siguiente manera

$$\begin{aligned}\psi_N(x, y, z) &= \frac{1}{\sqrt{8}} \left(e^{-jk_x x} + e^{jk_x x} \right) \left(e^{-jk_y y} + e^{jk_y y} \right) \left(e^{-jk_z z} + e^{jk_z z} \right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{8}} \left(e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} + e^{-j(k_x x + k_y y - k_z z)} + e^{-(k_x x - k_y y + k_z z)} + e^{-j(k_x x - k_y y - k_z z)} \right. \\ &\quad \left. + e^{j(k_x x + k_y y + k_z z)} + e^{j(k_x x + k_y y - k_z z)} + e^{j(k_x x - k_y y + k_z z)} + e^{j(k_x x - k_y y - k_z z)} \right)\end{aligned}\quad (3.64)$$

La cual muestra que un modo oblicuo puede ser descompuesto en ocho ondas planas de interferencia que se propagan en las direcciones (k_x, k_y, k_z) , $(k_x, k_y, -k_z)$, $(k_x, -k_y, k_z)$, $(k_x, -k_y, -k_z)$, $(-k_x, -k_y, -k_z)$, $(-k_x, -k_y, k_z)$, $(-k_x, k_y, -k_z)$ y $(-k_x, k_y, k_z)$. Estas ondas planas pueden ser interpretadas como una onda plana en incidencia oblicua y sus reflexiones de las paredes del cuarto. Las ocho ondas interfieren de tal manera que se cumplen las condiciones de frontera dadas por la ecuación (3.49).

Es importante enfatizar que el campo acústico en un recinto de forma arbitraria puede ser descompuesto en modos, aunque soluciones analíticas simples solamente están disponibles para recintos de forma rectangular, cilíndrica y esférica.

3.2.2 Densidad modal

La distribución exacta de las eigenfrecuencias de un cuarto rectangular depende de sus dimensiones, tal y como se indica por la ecuación (3.62). La *densidad modal*, definida como el número de modos promedio por ancho de banda, es en general una función algo irregular de la frecuencia; sin embargo, es posible derivar una expresión para este parámetro, como a continuación se muestra. De la observación que las frecuencias naturales de los modos axiales en al dirección x están equidistantemente distribuidas sobre el eje de la frecuencia

$$\frac{c}{2l_x}, \frac{c}{l_x}, \frac{3c}{2l_x}, \frac{2c}{l_x}, \dots \quad (3.65)$$

Se concluye que existen alrededor de $f/(c/2l_x)$ de tales modos debajo de la frecuencia f . En una forma similar se puede derivar una expresión aproximada para el número de modos

tangenciales $x - y$ debajo de la frecuencia f considerando el número de rectángulos con dimensiones $(c/2l_x, c/2l_y)$ en un cuarto de un círculo con radio f . El resultado es

$$N_{xy}(f) \cong \frac{\frac{1}{4}\pi f^2}{\frac{c}{2l_x} \frac{c}{2l_y}} = \frac{\pi l_x l_y}{c^2} f^2 \quad (3.66)$$

Y finalmente se puede derivar una expresión aproximada para el número de modos en tres dimensiones debajo de f considerando el número de cajas con dimensiones $(c/2l_x, c/2l_y, c/2l_z)$ en un octavo de una esfera de radio f

$$N(f) \cong \frac{\frac{1}{8} \frac{4}{3} \pi f^3}{\frac{c}{2l_x} \frac{c}{2l_y} \frac{c}{2l_z}} = \frac{4\pi V}{3c^3} f^3 \quad (3.67)$$

Obviamente, los modos en tres dimensiones dominarán excepto a bajas frecuencias; por tanto, los modos axiales y tangenciales serán ignorados. De esta manera, diferenciando la ecuación (3.67) con respecto a la frecuencia se obtiene la densidad modal

$$n(f) = \frac{dN(f)}{df} \cong \frac{4\pi V}{c^3} f^2 \quad (3.68)$$

Conforme la frecuencia aumenta, la densidad modal aumenta y es dominada por los modos oblicuos, y la ecuación (3.68) es conocida como la densidad modal asintótica. Ha sido mostrado por análisis estadístico que esta ecuación aplica en el límite asintótico de cualquier recinto, independientemente de su forma geométrica⁷⁴.

3.2.3 Factor de traslape modal

El ancho de banda de un modo es igual al producto de la frecuencia de resonancia y el factor de pérdida. Un *factor de traslape modal* puede ser definido para indicar el número promedio de frecuencias de resonancia que caen dentro del ancho de banda del modo promedio, donde su valor está dado por el producto de la frecuencia, factor de pérdida promedio y la densidad modal asintótica.

La validez teórica de las expresiones modales dadas en la sección 3.2.2 no están restringidas a bajas frecuencias; sin embargo, actualmente una aproximación completamente diferente,

basada en consideraciones estadísticas, es más útil a medias y altas frecuencias que la aproximación determinística descrita previamente. Existen dos razones del porque el interés en modelos estadísticos. La primera de ellas es que el problema de las expresiones basadas en suma de modos es que cuando cientos de términos complejos son sumados, el resultado es muy sensible a pequeños errores en cada término. Por ejemplo, la temperatura, velocidad del sonido y las dimensiones del recinto pueden ser ligeramente diferentes de las dimensiones usadas en el modelo. Incluso pequeños errores de modelado cambiarán las frecuencias naturales de los modos, y la amplitud y fase de cada uno de los términos que corresponden a modos próximos a sus frecuencias naturales pueden cambiar.

La otra razón es que los modelos estadísticos pueden ser bastante útiles para predecir características tales como el campo acústico en un cuarto reverberante sin contar con suficiente información. De este modo, las propiedades estadísticas de un campo acústico en un cuarto reverberante excitado con tonos puros pueden ser determinadas con detalle sin contar con datos del recinto.

Puesto que las frecuencias de resonancia de modos de orden superior son extremadamente sensibles a pequeñas variaciones en la geometría de las fronteras y la distribución de la impedancia, no pueden ser estimadas con exactitud. Un valor del factor de traslape modal de uno, representa la transición entre un régimen de dominancia de respuesta en frecuencia por picos a resonancias modales individuales y un régimen en el cual la respuesta en frecuencia depende de las respuestas relativas de amplitud y fase de un número de modos localmente resonantes. También representa una transición entre un intervalo de baja frecuencia en el cual las estimaciones determinísticas pueden ser realizadas de respuestas modales individuales a partir de información precisa de la geometría del recinto y sus propiedades de frontera; y un intervalo de alta frecuencia donde únicamente las estimaciones estadísticas tienen sentido.

El ancho de banda de los modos está definido como

$$\Delta f \cong \frac{2,2}{T_{60}} \quad (3.69)$$

Donde T_{60} es el tiempo de reverberación del recinto. Esta ecuación conduce a la siguiente expresión para el traslape modal

$$M \cong \frac{27,6V}{T_{60}c^3} f^2 \quad (3.70)$$

Donde V es el volumen del recinto. El traslape modal es en efecto el número de modos promedio excitados por un tono puro bajo la suposición de que cada modo es excitado solamente si la frecuencia del tono puro está dentro de una banda de ancho dado por la ecuación (3.69) centrado en la frecuencia natural del modo.

Investigación llevada a cabo durante la década de 1950, principalmente por Manfred Schroeder, mostraron que la transición al régimen probabilístico puede ser definido por aquella frecuencia en la cual el factor de traslape modal es igual a 3^{74} . Esta frecuencia es conocida como *frecuencia de Schroeder* o *frecuencia de cuarto grande*, y esta dada por

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (3.71)$$

3.2.4 Tiempo de reverberación

Consideremos ahora la relación de cambio de la energía acústica almacenada en un recinto reverberante durante la parte inicial del proceso de decaimiento de energía después de una excitación impulsiva. La distribución uniforme de la energía acústica en un recinto es una condición crucial para la validez de las expresiones que describen ya sea el decaimiento de campos acústicos o la energía de estado estacionario contenido en ellos.

El descriptor usual para el decaimiento exponencial del campo reverberante es el tiempo T_{60} requerido para que el promedio espacial de la densidad de energía caiga por un factor de 10^6 (60 dB), el cual es llamado *tiempo de reverberación* T_{60} . Una de las principales contribuciones de Sabine en la acústica de recintos fue el descubrimiento experimental que para un cuarto vacío de volumen V , el tiempo de reverberación T_{60} se puede predecir de la ecuación⁹

$$T_{60} = \frac{0,161V}{\sum_i \alpha_i A_i} \quad (3.72)$$

donde la suma contempla todas las distintas porciones del área total de la superficie del recinto. El modelo sugiere que α_i es una propiedad intrínseca del material de la pared (que depende de la frecuencia) y que es independiente del tipo y ubicación de la fuente, ubicación del área A_i y de los recubrimientos sobre otras porciones de las superficies.

La medición del tiempo de reverberación es una medición normalizada, y la norma internacional empleada es la ISO 354⁷⁶.

3.3 Teoría del aislamiento acústico

Cuando una onda sonora incide sobre una superficie, una parte de su energía es absorbida, otra reflejada y otra transmitida. El aislamiento acústico, expresado en función de distintas magnitudes físicas, brindará información sobre la proporción de la energía transmitida con respecto a la energía incidente.

Existen dos métodos principales para restringir la transmisión de energía acústica de una región a otra. En la primera, la energía acústica es absorbida por materiales y eficientemente disipada en calor. Alternativamente, el sonido puede ser reflejado introduciendo un gran cambio de la impedancia acústica en la trayectoria de transmisión; por ejemplo, particiones de placas sólidas tales como paredes de cuartos y enclaustramientos industriales para control de ruido.

El sonido puede transmitirse por vía aérea (al incidir la onda sonora sobre una superficie, esta vibra, y a la vez hace vibrar al aire del recinto contiguo) o por vía estructural (se hace vibrar la superficie mediante la acción de una fuerza externa, transmitiéndose la vibración al aire contiguo por medio de la vibración de dicha superficie). En este sentido se definen dos tipos de aislamiento para una misma superficie: aislamiento a ruido aéreo y aislamiento a ruido de impacto. En el presente trabajo cuando se hable de aislamiento acústico se entenderá como aislamiento a ruido aéreo.

El término *aislamiento acústico* usualmente implica la reducción neta de sonido que ocurre cuando éste es transmitido por todas las posibles trayectorias de sonido tales como particiones de edificios, estructuras de edificios y ductos entre cuartos. Mientras que el término *índice de*

reducción de ruido aplica solamente a particiones y define la característica inherente del material de una partición de resistir la transmisión de sonido en determinada frecuencia.

En el presente apartado se describen algunos conceptos relacionados con la radiación acústica por estructuras vibratorias y la transmisión de sonido a través de particiones. El tema de radiación acústica de estructuras vibratorias es de gran importancia práctica; por ejemplo, los diseñadores de altavoces deben entender el mecanismo de radiación acústica a fin de que puedan mejorar la calidad del producto, y el ingeniero de control de ruido debe entender la naturaleza y métodos de control de radiación acústica de estructuras vibratorias.

Además, se describen brevemente las diferentes zonas, en cuanto a aislamiento acústico, de las particiones simples y dobles.

3.3.1 Radiación acústica por estructuras

Las estructuras que radian sonido a través de vibración son extremadamente diversas en sus formas geométricas, propiedades de sus materiales y formas de construcción. Aunque se puede decir que el mecanismo de generación de sonido por la vibración de una superficie (aceleración del fluido en contacto con la superficie) es común para todas las fuentes sonoras, la eficiencia de radiación en relación a la amplitud de la vibración varía ampliamente de una fuente a otra.

Respecto a la generación de sonido por una superficie vibratoria, se puede decir que la aceleración normal a la superficie, y la distribución espacial de esta, influyen significativamente la eficiencia de la compresión del fluido, y por tanto, la radiación acústica.

A continuación se describen los métodos para medición de la potencia radiada; así como, la definición, medición y eficiencia de radiación. Estos apartados se obtienen de la referencia [77].

3.3.1.1 Medición de la potencia radiada

La medición de la potencia radiada por un objeto puede ser determinada con facilidad ubicando el objeto en un cuarto reverberante de volumen V y tiempo de reverberación T_{60}

conocido. La potencia acústica radiada P_a puede ser obtenida de la presión acústica promedio

$\overline{p^2}$

$$P_a = 13,8 \frac{V}{\rho c^2} \overline{p^2} \quad (3.73)$$

Y el nivel de potencia acústica es expresado como

$$L_{P_a} = 10 \log \frac{P_a}{P_{a_0}} \quad (3.74)$$

donde el valor de referencia $P_{a_0} = 10^{-12} W$.

Es posible desarrollar una relación entre los valores de referencia para potencia y presión considerando la potencia transportada por una onda plana en aire a través de una superficie S perpendicular a la dirección de propagación

$$P_a = \frac{\overline{p^2} S}{\rho c} \quad (3.75)$$

La definición del nivel de potencia conduce a valores simples en la relación para presiones acústicas en cuartos reverberantes. Reescribiendo la ecuación (3.73)

$$L_{P_a} = 10 \log \frac{P_a}{P_{a_0}} = \left[10 \log \frac{13,8V}{cTS_0} + 10 \log \frac{\overline{p_0^2} S_0}{\rho c P_{a_0}} + 10 \log \frac{\overline{p^2}}{\overline{p_0^2}} \right] \quad (3.76)$$

Entonces el tercer término es igual al nivel de presión acústica, y el segundo desaparece aproximadamente para $S_0 = 1m^2$. La relación $13,8V/cT$ tiene unidades de área, y es igual a un cuarto de así llamada *área de absorción equivalente* A . Entonces la ecuación (3.76) queda de la siguiente manera

$$L_{P_a} \approx L_p + 10 \log \frac{A}{4} \quad (3.77)$$

la cual relaciona el nivel de presión y potencia acústica en términos del área de absorción. De esta manera, la exactitud con la cual la potencia acústica puede ser medida por el método del cuarto reverberante depende del volumen, forma y tiempo de reverberación del cuarto de

prueba; así como del número de puntos de medición y del carácter del sonido dentro del recinto.

Un segundo método para medir la potencia radiada por un objeto consiste en ubicar éste en un espacio abierto o en una *cámara anecoica*, y medir la presión acústica en varios puntos a una distancia R , la cual debe ser considerablemente más grande que cualquiera de las dimensiones del objeto de prueba. La potencia radiada está dada por

$$P_a = \frac{1}{\rho c} \sum \overline{p_n^2} S_n \quad (3.78)$$

Donde S_n representa el elemento de la superficie asociado con la presión acústica p_n . Para el caso especial donde todos los puntos de medición están uniformemente distribuidos sobre un hemisferio

$$P_a = \frac{2\pi R^2}{\rho c} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \overline{p_n^2} = \frac{2\pi R^2}{\rho c} \overline{p^2} \quad (3.79)$$

3.3.1.2 Definición de la eficiencia de radiación

Generalmente se desea conocer no solo la potencia radiada, sino también la relación entre ésta y las vibraciones estructurales, la cual es descrita en términos de la llamada *eficiencia de radiación* σ , y definida como

$$\sigma = \frac{P_a}{\rho c S \overline{v^2}} \quad (3.80)$$

Donde \overline{v} denota la velocidad promedio de la superficie de radiación. La forma logarítmica de la ecuación (3.80) es

$$10 \log \sigma = \left[10 \log \frac{P_a}{P_{a_0}} + 10 \log \frac{P_{a_0}}{\rho c S_0 v_0^2} - 10 \log \frac{S}{S_0} - 10 \log \frac{\overline{v^2}}{v_0^2} \right] \quad (3.81)$$

El primer término de la ecuación (3.81) corresponde al nivel de potencia definido en la sección 3.3.1.1. El segundo término desaparece porque el numerado y el denominador son aproximadamente igual para un área de referencia $S_0 = 1m^2$ y una velocidad de referencia $v_0 = 50 \times 10^{-9} m/s$, y una potencia de referencia $P_{a_0} = 10^{-12} W$. De esta manera la ecuación (3.81) se reduce a

$$10 \log \sigma = L_{p_a} - L_v - 10 \log \frac{S}{m^2} \quad (3.82)$$

indicando que $10 \log \sigma$ es igual a la diferencia entre el nivel de potencia y velocidad, si el área de radiación es de $1 m^2$.

Combinando la ecuación (3.77) y (3.82), se obtiene

$$10 \log \sigma = L_p - L_v + 10 \log \frac{A}{4S} \quad (3.83)$$

De esta manera, es posible determinar la eficiencia de radiación de un objeto de prueba midiendo el nivel de presión acústica promedio que produce en un cuarto reverberante, el nivel de velocidad del área de radiación, y el área de absorción (o el tiempo de reverberación) del cuarto.

3.3.2 Aislamiento acústico de particiones simples

El aislamiento acústico de una partición está determinado por factores físicos tales como la masa y la rigidez. Por ejemplo en una pared doble, la profundidad de los espacios de aire, la presencia o ausencia de material absorbente y el grado del acoplamiento mecánico entre las capas afectan críticamente el aislamiento acústico. En el caso de una pared simple las propiedades aislantes varían considerablemente con la frecuencia, dado que la eficiencia de una estructura como un aislador acústico está determinado por cuatro parámetros: masa, homogeneidad y uniformidad, rigidez y discontinuidad.

Debido a que una onda acústica al encontrarse con la partición crea un movimiento de onda de flexión, el cual es re-radiado en el lado lejano de la partición como sonido transmitido, es razonable esperar que una partición de mayor peso obstruirá a las ondas acústicas mejor que una partición más ligera debido a su mayor inercia. El aislamiento acústico de una partición

también es función de la homogeneidad de esta, la cual puede ser modificada por un cambio de densidad superficial o espesor.

En la figura 3 se muestran las zonas de aislamiento de una partición en función de la frecuencia.

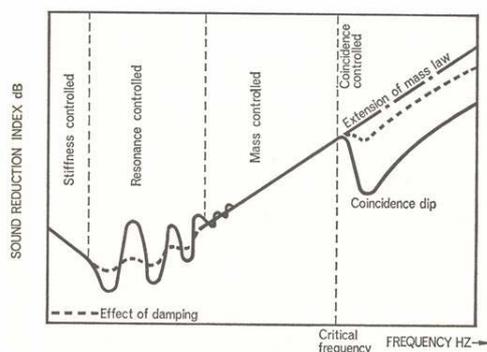


Figura 3. Zonas de aislamiento de una pared simple

Zona 1. A bajas frecuencias, la pared se comporta como un resorte o placa vibrante. Esta zona se compone de una región donde el aislamiento acústico decae conforme se aumenta la frecuencia, la cual está controlada por la rigidez de la partición; y otra región que es controlada por la primera frecuencia de resonancia del panel. El coeficiente de transmisión τ y el índice de reducción de ruido R en incidencia normal son definidos como⁷⁸

$$\tau \cong \left(\frac{2\rho c \omega}{s} \right)^2 \tag{3.84}$$

$$R \cong 20 \log(s) - 20 \log(f) - 20 \log(4\pi\rho c)$$

R es determinado primeramente por la rigidez del montaje y es insensible a la masa y al amortiguamiento, y disminuye con la frecuencia 6 dB por octava.

Zona 2. El aislamiento acústico de una pared simple en este intervalo de frecuencias está gobernado por su masa, donde el índice de reducción de ruido incrementa 6 dB por el doble de la densidad superficial, y 6 dB por banda de frecuencia en octavas. Este comportamiento es conocido como *ley de masas* de materiales homogéneos e isotrópicos, la cual en incidencia normal⁷⁸ está dada por

$$\tau \cong \left(\frac{2\rho c}{\omega m} \right)^2 \tag{3.85}$$

$$R \cong 20 \log(mf) - 20 \log \frac{\rho c}{\pi}$$

A fin de investigar la influencia relativa de la masa, rigidez y amortiguamiento de la partición, es útil considerar las condiciones bajo las cuales la onda incidente es coincidente con la onda de flexión sobre la partición, y en base a Fahy⁷⁸ para un determinado ángulo de la onda incidente existe una única frecuencia de coincidencia. De esta manera, el límite más bajo para el fenómeno de coincidencia está dado por

$$f_c = \frac{c^2}{\pi d} \left[\frac{3\rho(1-\nu^2)}{E} \right]^{1/2} \tag{3.86}$$

la cual es conocida como *frecuencia crítica*. Es claro de la ecuación (3.86) que particiones ligeras y rígidas tienden a exhibir frecuencias críticas inferiores que particiones homogéneas de masa similar pero de rigidez más baja. La frecuencia crítica f_c define el límite superior de la zona.

Prácticamente, la distribución direccional de la intensidad incidente es raramente conocida, y por tanto un modelo ideal de campo difuso es asumido, en el cual la incidencia de las ondas planas es en todas direcciones con igual probabilidad y con fase aleatoria. El índice de reducción de ruido, con un campo difuso incidente, es 5 dB menor que aquel teóricamente calculado para incidencia normal, esto es

$$R_d \cong 20 \log(mf) - 20 \log \frac{\rho c}{\pi} - 5 \tag{3.87}$$

La cual es llamada *ley de masas en incidencia aleatoria*. Los dos factores principales que pueden causar que la transmisión en campo difuso de paneles finitos difiera significativamente de paneles infinitos son: (i) la existencia de modos de onda estacionaria y frecuencias de resonancia asociadas, y (ii) difracción de la apertura de montaje de la muestra de prueba.

La expresión para el coeficiente de transmisión, dada por Sewell (consultado por Fahy⁷⁸) de un panel de área A , a una frecuencia correspondiente al número de onda k , puede ser

expresado en términos del índice de reducción de ruido para frecuencias subcríticas ($\omega < \omega_c$) como

$$R \cong 20 \log(mf) - 20 \log \frac{\rho c}{\pi} - 10 \log \left[\ln(kA^{1/2}) + 20 \log \left[1 - (\omega/\omega_c)^2 \right] \right] \quad (3.88)$$

La ecuación (3.88) fue comparada por Quirt⁷⁹ con la expresión de incidencia aleatoria (3.87) y encontró ser superior a bajas frecuencias⁷⁸.

Zona 3. En el intervalo de altas frecuencias, el índice de reducción de ruido es adversamente afectado por el fenómeno de coincidencia. A bajas frecuencias, dentro de la zona 3, la longitud de onda de flexión es más corta que la longitud de onda acústica y las dos no se pueden igualar, por lo que la transmisión de sonido es mínima. Conforme la frecuencia se incrementa, se encuentra un punto donde la longitud de onda de flexión se iguala a la longitud de onda acústica, por lo que el panel ofrece muy poca resistencia a la transmisión acústica y el índice de reducción de ruido cae considerablemente a esta frecuencia, a lo cual se le conoce como *frecuencia crítica o de coincidencia*. A frecuencias más altas la longitud de onda acústica es más corta que la longitud de onda de flexión, y existirá siempre un ángulo de incidencia en el cual la trayectoria de la onda a lo largo de la longitud del panel se igualará a la onda flexión y dará origen a la coincidencia. Sin embargo, el efecto de coincidencia disminuye conforme la frecuencia se incrementa o el ángulo de incidencia disminuye y el índice de reducción de ruido aumenta. Debido a que la coincidencia puede ser considerada análoga a la resonancia, el índice de reducción de ruido del panel en este intervalo de frecuencia depende principalmente del amortiguamiento del panel.

El índice de reducción de ruido en incidencia normal⁷⁸ cuando $\omega = \omega_0$ está dado por

$$R = 20 \log(mf_0) - 20 \log \frac{\rho c}{\pi} + 20 \log \eta \quad (3.89)$$

Donde la transmisión en la resonancia depende de la masa, rigidez y el amortiguamiento, y que el amortiguamiento mecánico excede al amortiguamiento de radiación.

La estimación del índice de reducción de ruido en incidencia aleatoria⁷⁸ es como sigue:

(1) frecuencias subcríticas, $\omega < \omega_c$

$$R = 20 \log(mf) - 20 \log \frac{\rho c}{\pi} - 10 \log \left[\frac{3}{2} + \ln \left(\frac{2\omega}{\Delta\omega} \right) \right] + \frac{16c^2}{\eta\omega_c} \frac{1}{(\omega\omega_c)^{1/2}} \left(\frac{a^2 + b^2}{a^2 b^2} \right) \left[1 + \frac{2\omega}{\omega_c} + 3 \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \right] \quad (3.90)$$

El término que contiene η representa la contribución resonante a la transmisión, de lo cual se puede observar que aumenta en significado conforme el tamaño de la partición disminuye.

(2) frecuencias supercríticas, $\omega > \omega_c$

$$R = 20 \log(mf) - 20 \log \frac{\rho c}{\pi} + 10 \log \frac{f}{f_c - 1} + 10 \log \eta - 2 \quad (3.91)$$

(3) Banda de frecuencia centrada en ω_c , $\Delta\omega/\omega_c > (k_c a)^{-1}, (k_c b)^{-1}$

$$R = 20 \log(mf) - 20 \log \frac{\rho c}{\pi} + 10 \log \left(\frac{2\eta \Delta\omega}{\pi \omega_c} \right) \quad (3.92)$$

3.3.3 Aislamiento acústico de particiones dobles

Con la finalidad de aumentar el aislamiento acústico de una partición, en la práctica se recurre a la construcción de particiones de más de una lámina. Una pared doble forma un sistema masa-resorte, donde el aislamiento acústico está basado en la interacción de las dos masas y el espacio de aire entre ellas. En la pared doble, la onda acústica incide sobre uno de los paneles de la pared, y el espacio de aire entre los dos paneles funciona como “resorte”, transmitiendo el movimiento oscilatorio de un panel a otro, ver figura 4. Mientras más grande sea la distancia entre los dos paneles de una pared doble, ésta será más flexible y transmitirá una menor vibración al otro panel, de tal manera que el aislamiento es mejorado.

En base a Hongisto⁵⁸, la transmisión estructural a través de una partición doble puede ser predecida por el modelo de Sharp cuando la cavidad entre los dos paneles es rellena de material absorbente suponiendo de esta manera que no existe resonancia en la cavidad, o por el modelo de Cummings and Mulholland cuando la cavidad está vacía. El modelo sugerido por Sharp toma en cuenta las conexiones entre paneles, y dichos resultados concuerdan con las

mediciones a medias y altas frecuencias, pero a altas frecuencias el modelo sobreestima el índice de reducción de ruido. Aunque el autor concluye que los diferentes paneles dobles no pueden ser modelados con un solo modelo, y que la selección del modelo depende del parámetro físico bajo estudio; además, de que un modelo híbrido debería ser desarrollado a partir de una combinación de los modelos existentes.

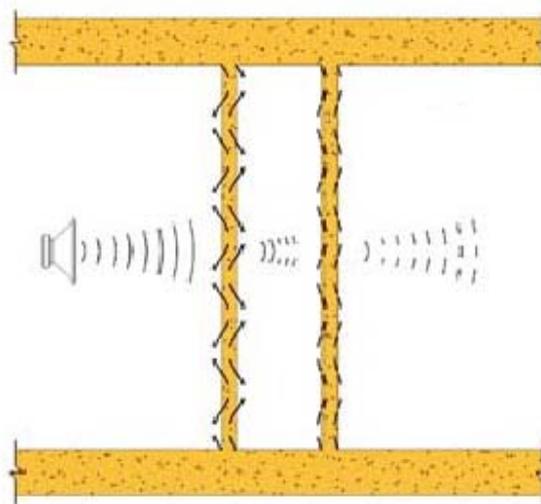


Figura 4. Comportamiento acústico de una pared doble

En la figura 5 se muestra el comportamiento típico del aislamiento acústico de una partición doble.

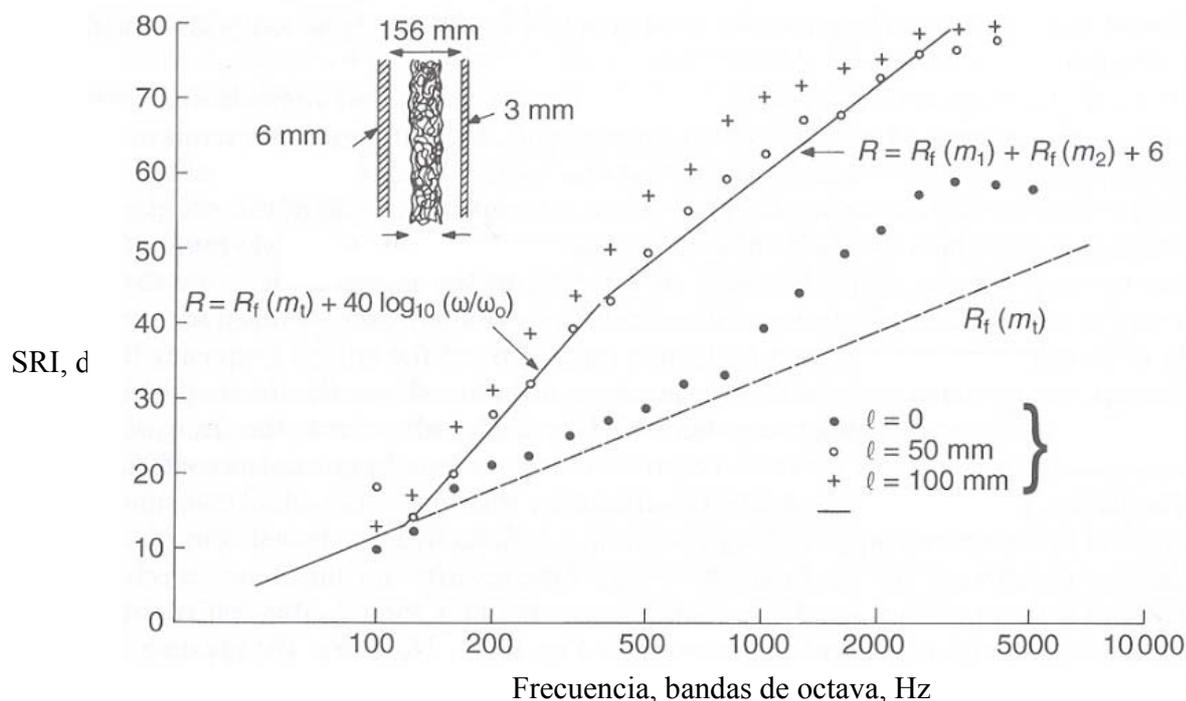


Figura 5. Aislamiento acústico de una pared doble mecánicamente aislada

A altas frecuencias son formadas ondas estacionarias en el espacio de aire entre los dos paneles de la partición doble, reduciendo de esta manera el aislamiento acústico. El efecto de dichas ondas estacionarias es reducido montando material absorbente (fibra de vidrio, por ejemplo) entre los dos paneles.

El aislamiento acústico de una pared doble se incrementa rápidamente arriba del intervalo de frecuencia de resonancia (ver figura 5), pero dentro de este intervalo, dicho parámetro acústico es menor que aquel presentado por una pared simple de la misma masa. Si el amortiguamiento acústico y mecánico y la rigidez no son consideradas, la frecuencia de resonancia masa-resorte-masa es determinada como⁷⁸

$$\omega_0 = \left[\frac{\rho c^2}{d} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right]^{1/2} \quad (3.93)$$

Debajo de la frecuencia de resonancia de la partición doble, el aislamiento acústico es determinado por la ley de masas, el cual puede ser determinado a partir de la ecuación (3.87)

para incidencia aleatoria considerando la masa como suma de las masas de los dos paneles de la partición doble.

Arriba de la frecuencia de resonancia de la partición doble, el índice de reducción de ruido (SRI-de sus siglas en inglés) se incrementa a razón de 18 dB/octava, comportándose como si los dos paneles de la partición estuviesen desacoplados. La explicación física es que el panel 2 actúa como una masa manejada a través de un resorte por el movimiento del panel 1, arriba de la frecuencia de resonancia del sistema. El SRI en incidencia aleatoria en este intervalo de frecuencia es determinado como

$$R = 20 \log(m_t f) - 20 \log\left(\frac{\rho c}{\pi}\right) + 20 \log(2kd) - 5 \quad (3.94)$$

Cuando la el ancho de la cavidad entre los dos paneles es comparable a la longitud de onda, los modos de la cavidad se acoplan a los modos del panel y el SRI se incrementa a razón de 12 dB/octava. La expresión para calcular el SRI en este intervalo de frecuencia es

$$R = R_d(m_1) + R_d(m_2) + 6 \quad (3.95)$$

3.4 Normatividad para la medición del aislamiento acústico

El método tradicional de medición del aislamiento acústico en laboratorio, en el cual la magnitud medida es la presión acústica, exige el uso de una *cámara de transmisión* formada por dos cuartos reverberantes aislados estructuralmente cuyas características están descritas en la norma ISO 140-1³. El procedimiento de medición bajo condiciones de laboratorio está descrito en la norma ISO 140-3⁶⁰, y la ASTM E90⁸⁰.

La técnica de intensidad acústica ofrece un método alternativo para la medición del aislamiento acústico tanto en condiciones de laboratorio como *in situ*, en el cual solo se precisa el uso de un recinto reverberante. El procedimiento de medición por el método de intensidad está descrito en la norma ISO 15186-1⁸ y 15186-2⁸¹ para condiciones de laboratorio e *in situ*, respectivamente.

En el presente apartado se describe brevemente la teoría y el procedimiento de medición de la norma ISO 140-3, ISO 15186-1 e ISO 15186-2.

3.4.1 Aislamiento acústico por el método de presión

La norma ISO 140-3⁶⁰ especifica un método de laboratorio para la medición del SRI de elementos de edificios tales como paredes, pisos, puertas, ventanas, elementos de fachadas y fachadas; excepto aquellos elementos clasificados como pequeños. Las mediciones deben ser realizadas en laboratorios donde la transmisión de sonido por trayectorias de flanqueo ha sido eliminada.

La determinación del SRI usando el método de presión es relativamente complicada si el aislamiento entre los dos cuartos reverberantes no es suficiente, lo cual es usual cuando muestras de prueba pequeñas o de alta densidad superficial son probadas. El flanqueo vía otras superficies diferentes a la de la muestra, puede causar sobreestimación de la potencia acústica radiada por ésta, y en consecuencia una subestimación del índice de reducción de ruido.

Planteamiento teórico. La norma ISO 140-3⁶⁰ exige que el campo acústico tanto en el cuarto fuente como en el receptor sea difuso, y que el sonido radiado en el último sea transmitido únicamente vía la muestra de prueba. Asumiendo que se cumplen estas condiciones, el índice de reducción de ruido de una muestra de prueba se obtiene mediante la estimación de la potencia acústica incidente sobre ésta W_1 , y la potencia acústica transmitida a través de la muestra al cuarto receptor W_2 , y la relación entre presión p e intensidad acústica I está dada por

$$I_1 = \frac{p_1^2}{4\rho c} \quad (3.95)$$

Así, la potencia acústica en el cuarto fuente está dada como

$$W_1 = I_1 S \quad (3.96)$$

En la sala receptora es necesario considerar la absorción acústica equivalente A_r del cuarto debido a que cierta parte de la energía acústica es absorbida por las paredes

$$W_2 = \frac{p_2^2}{4\rho c} A_r \quad (3.97)$$

De esta manera el índice de reducción de ruido está dado por

$$R = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A_r} \right) \quad (3.98)$$

donde L_1 y L_2 son los niveles de presión acústica en el cuarto fuente y receptor, respectivamente, y S es el área de la muestra de prueba. En base a la norma ISO 354 [17], el área de absorción acústica equivalente se obtiene de

$$A_r = 0,163 \cdot \frac{V_r}{T_{60}} \quad (3.99)$$

donde V_r y T_{60} son el volumen y tiempo de reverberación del cuarto receptor, respectivamente.

La condición de campo difuso en los cuartos reverberantes es complicada lograrla especialmente a bajas frecuencias donde las dimensiones de la muestra son comparables a la longitud de onda del sonido.

Procedimiento de medición. La norma describe con detalle los aspectos relacionados a la fuente sonora tales como sus características de emisión (ruido blanco, y el espectro en el cuarto fuente no debe tener diferencias en nivel mayores a 6 dB entre bandas contiguas), relación señal/ruido, puntos de ubicación dentro del cuarto fuente y receptor (que garanticen un campo difuso) para mediciones tanto del nivel de presión acústica como del tiempo de reverberación. Asimismo, describe el tiempo de promediación, número y posiciones de los micrófonos con respecto a las diferentes superficies del cuarto y la fuente sonora con el fin de cubrir un amplio intervalo de frecuencia de medición y asegurar que las mediciones no se realicen en el campo directo de la fuente. En el caso de optar por emplear un *boom* giratorio para el micrófono, la norma ISO 140-3⁶⁰ especifica que el radio mínimo debe ser de 1 m y el tiempo de giro de 60 s, y la posición del plano de giro con respecto a las diferentes superficies no debe ser coincidente.

Se menciona que las mediciones deben ser realizadas en bandas de tercios de octava en el intervalo de frecuencia de 100 Hz a 5 kHz. Además, de una ecuación de corrección a los niveles de presión acústica medidos en el cuarto receptor cuando no se cumpla la condición de que éstos sean mayores a los niveles de ruido de fondo al menos 15 dB re 20 μ Pa.

Para la medición del tiempo de reverberación hace referencia a la norma ISO 354⁷⁶; además de especificar que al menos se debe medir en una posición de la fuente sonora, tres posiciones del micrófono y dos repeticiones por cada posición.

La repetibilidad de las mediciones debe estar de acuerdo a lo establecido en la norma ISO 140-2⁶¹.

3.4.2 Aislamiento acústico por la técnica de intensidad acústica

La norma ISO 15186-1⁸ especifica el método de intensidad acústica para determinar el índice de reducción de ruido y la diferencia de nivel normalizado de elementos de edificios. Este método puede ser usado como una alternativa para aquel especificado en la norma ISO 140-3⁶⁰, específicamente cuando el método tradicional presenta problemas debido a una alta transmisión por flaqueo.

La norma ISO 15186-2⁸¹ especifica el método de intensidad para determinar el índice de reducción de ruido bajo condiciones *in situ*, de paredes, pisos, puertas, ventanas y pequeños elementos de edificios. Este método tiene el propósito de ser usado en la presencia de transmisión por flaqueo, y es empleado cuando no se cumplen los requerimientos de la referencia [8].

Planteamiento teórico. Si el campo acústico en el cuarto emisor es difuso, entonces la intensidad acústica incidente sobre la muestra de prueba está dada por la ecuación (3.95), como para el caso del método convencional. De esta manera, midiendo el nivel de presión acústica promedio en la parte central del cuarto emisor, es posible calcular el nivel de intensidad incidente sobre la muestra de prueba. A partir de mediciones directas de intensidad acústica sobre una superficie de medición del lado receptor, la relación entre la potencia transmitida y la intensidad es directa, y el índice de reducción de ruido queda definido de la siguiente manera

$$\begin{aligned} R &= 10 \log \left(\frac{W_1}{W_{2I}} \right) = 10 \log \left(\frac{p_1^2 S}{4 \rho c I_{n2} S_m} \right) = \\ &= L_1 - 6 - \left[L_{r_n} + 10 \log \left(\frac{S_m}{S} \right) \right] + K_C \end{aligned} \tag{3.100}$$

donde W_{2l} es la potencia transmitida calculada a partir de mediciones de intensidad acústica, S_m es el área de la superficie de medición, y L_{I_n} es el nivel de intensidad acústica normal a la superficie de medición. La corrección de Waterhouse (corrección a bajas frecuencias) K_C está dada por

$$K_C = 10 \log \left(1 + \frac{S_{br} \lambda}{8V_r} \right) \quad (3.101)$$

donde S_{br} es el área de todas las superficies interiores del cuarto receptor. La corrección de Waterhouse, en cuartos pequeños, solo toma valores apreciables a bajas frecuencias, que es donde el campo difícilmente reúne las condiciones para considerarse un campo difuso, debido a la baja densidad modal del cuarto (modos bastante separados). Es importante señalar que la corrección de Waterhouse se propone cuando el objetivo es comprar los resultados obtenidos por el método de intensidad con aquellos del método de presión.

La referencia [8] menciona dos indicadores para las mediciones de intensidad, uno que considera la característica intrínseca de desfaseamiento del sistema de medición: índice presión-intensidad residual δ_{pI_0} , otro que es considerado un indicador de campo llamado indicador presión-intensidad superficial denotado por F_2 , Δ_{pI} o F_{pI} según la referencia consultada.

El indicador de campo F_2 , así como los indicadores F_3 y F_4 mencionados en la referencia [7], necesarios para definir la calidad del campo acústico en el cuarto receptor, son definidos como

$$F_2 = \bar{L}_p - \bar{L}_{|I_n|} \quad (3.102)$$

$$F_3 = \bar{L}_p - \bar{L}_{I_n} \quad (3.103)$$

$$F_4 = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_{n_i} - \bar{I}_n)^2} \quad (3.104)$$

El indicador de campo F_3 difiere de F_2 si existen valores negativos de intensidad acústica en la superficie de medición, lo cual ocurre cuando existen fuentes de ruido extrañas con nivel significativo, que podrían ser en este caso flanqueo y regiones de fuga acústica sobre la

muestra de prueba.

El indicador de no uniformidad del campo F_4 brinda información acerca de la complejidad del campo de intensidad acústica sobre la superficie de medición. Altos valores de F_4 indican que el flujo de sonido no es uniforme sobre la superficie y que el número de puntos de medición puede ser insuficiente. El criterio $N < CF_4^2$ es usado para evaluar si el número de puntos de medición es suficiente; donde C es una constante que depende del grado de exactitud deseado y está dado por la Tabla B.2 de la norma ISO 9614-1⁷. Este criterio debe cumplirse para mantener la desviación estándar de los valores de intensidad suficientemente baja.

Procedimiento de medición. El equipo para la medición de los niveles de presión acústica en el recinto emisor debe cumplir con los requerimientos sugeridos en la norma ISO 140-3. Además, el micrófono de condensador empleado en el recinto fuente debe tener una respuesta en frecuencia plana en campo difuso. El equipo de medición de intensidad acústica debe cumplir con los requerimientos establecidos en la norma IEC 61043⁵⁹ para clase 1, y antes de cada medición debe realizarse una verificación del nivel de presión e intensidad acústica, y de la velocidad de la partícula³⁷, así como una calibración al menos cada año⁸².

Método bajo condiciones de laboratorio

Para la determinación del SRI bajo condiciones de laboratorio, el cuarto fuente, la abertura de prueba entre ambos recintos y las condiciones de montaje de la muestra deben cumplir los requerimientos sugeridos en la norma ISO 140-1³.

Las características de emisión de la fuente sonora y las posiciones de ésta dentro del recinto fuente deben cumplir con lo establecido en la norma ISO 140-3⁶⁰, y los puntos de ubicación de los micrófonos y la distancia de estos con respecto a la fuente sonora y cualquier superficie del cuarto deben estar conforme a esta norma.

Sobre el lado del cuarto receptor se define una superficie de medición que cubra completamente la muestra de prueba. Inicialmente se define una distancia muestra de prueba-sonda de intensidad (la cual llamaremos distancia muestra-sonda) entre 10 cm y 30 cm, evitando una distancia menor a los 10 cm para caer dentro del campo cercano de la superficie vibrante. Para definir el número de puntos de medición, la distancia muestra-sonda y el

espaciador a emplear, se debe seguir el procedimiento (para grado de exactitud 2) indicado en el anexo B de la norma ISO 9614-1⁷, en el caso de la medición por puntos discretos. A partir de la ecuación (3.43), $F_2 < \delta_{p_0 I_0} - 10$ con un grado de exactitud de 2. El tiempo de medición en cada uno de los puntos de la superficie de medición debe ser al menos de 10 s.

El intervalo de frecuencia de medición debe ser de 100 Hz a 5 kHz en bandas de tercio de octava. Además, el ruido de fondo debe ser menor al menos 10 dB que el nivel de presión e intensidad acústica medidos en el recinto receptor.

La reproducibilidad del método de intensidad para aislamiento acústico es igual o mejor que aquel dado en la norma ISO 140-3⁶⁰.

Método bajo condiciones in situ

Para mediciones *in situ*, se deben considerar aspectos como la absorción, volumen y difusión del cuarto para elegir el cuarto fuente y receptor. En el caso de que se desee comparar los resultados de éste método con aquellos obtenidos por la ISO 140-3⁶⁰, las condiciones de montaje de la muestra de prueba deben ser como lo establece dicha norma.

Las posiciones de la fuente sonora y sus características de emisión; así como el procedimiento de medición de los niveles de presión acústica deben ser conforme a la norma ISO 140-4⁸³.

El cuarto receptor puede ser cualquier espacio que cubra los requerimientos del indicador de campo $F_2 < \delta_{p_0 I_0} - 7$ (donde de la ecuación (3.43) $K = 7$, para un grado de exactitud 3) para muestras de prueba reflejantes y del ruido de fondo, el cual debe ser menor al menos 10 dB del nivel de presión e intensidad acústica.

Al igual que el método bajo condiciones de laboratorio, se define sobre el lado del cuarto receptor una superficie de medición que cubra completamente la muestra de prueba, e inicialmente se define una distancia muestra-sonda entre 10 cm y 30 cm. La superficie de medición debe ser elegida de tal forma que el volumen de medición no contenga superficies absorbentes que no sean parte de la muestra de prueba. Si esto no es posible, entonces las superficies absorbentes que no son parte de la muestra de prueba serán cubiertas con material que tenga un coeficiente de absorción menor a 0,1 en cada banda de tercio de octava. Una

muestra de prueba es considerada absorbente si el coeficiente de absorción es mayor a 0,5 en cada banda de tercio de octava.

La intensidad acústica reportada \bar{L}_l deberá ser positiva, la cual representará el flujo de energía acústica desde la muestra de prueba. Para definir el número de puntos de medición, la distancia muestra-sonda y el espaciador a emplear, se debe seguir el procedimiento (para grado de exactitud 2) indicado en el anexo B de la norma ISO 9614-1⁷, en el caso de la medición por puntos discretos. El tiempo de medición en cada uno de los puntos de la superficie de medición debe ser al menos de 10 s.

El intervalo de frecuencia de medición debe ser de 100 Hz a 3,15 kHz en bandas de tercio de octava, y como información adicional se manejan los resultados a 4 kHz y 5 kHz.

La reproducibilidad de éste método para aislamiento acústico es igual o mejor que aquel dado en la norma ISO 140-4⁸³ para muestras pequeñas.

3.4.3 Corrección a bajas frecuencias

Como se mencionó previamente, la técnica más común para determinar el índice de reducción de ruido de particiones hace uso de una cámara de transmisión, donde es creado un campo difuso en el cuarto emisor y transmitido vía la partición al cuarto receptor, considerando que todas las trayectorias de flanqueo son mínimas. En las normas internacionales para determinación de aislamiento acústico^{8,60,81,83} se supone que el campo acústico es difuso en el recinto fuente (para el método convencional debe ser difuso en ambos recintos reverberantes); es decir, con igual probabilidad de flujo de energía en todas direcciones. La suposición de campo difuso solamente es válida en el intervalo de medias y altas frecuencias, debido a que a bajas frecuencias el campo acústico en las cámaras reverberantes es dominado por un número pequeño de modos normales⁸⁴.

La norma ISO 140-3⁶⁰ propone, en uno de sus anexos, una guía para las mediciones de aislamiento acústico a bajas frecuencias. En dicho anexo existen recomendaciones para incrementar la distancia entre el micrófono y las fronteras del cuarto y el muestreo del campo acústico. Asimismo, se propone incrementar el número de posiciones de la fuente sonora,

tiempo de promediación, y el uso de materiales absorbentes para disminuir el tiempo de reverberación

La norma ISO 15186^{8,81} sugiere una expresión para el índice de reducción de ruido para cuando se desee comparar las mediciones por la técnica de intensidad con aquellas obtenidas por el método de presión conforme a la norma ISO 140-3⁶⁰. Esta corrección es conocida como *corrección de Waterhouse*, y es aplicada para tomar en cuenta las altas densidades de energía en las fronteras del recinto que son función de los efectos de interferencia y que son importantes a bajas frecuencias.

El concepto de campo difuso, desde el punto de vista teórico, implica las siguientes condiciones: (i) distribución espacial uniforme; (ii) igual flujo de energía promedio en todos los puntos; y (iii) relación de fase aleatoria entre los diferentes trenes de ondas que convergen en un mismo punto. Waterhouse⁴⁶ demostró que aunque se cumplan las dos primeras condiciones, las fases de los trenes de ondas en la zona próxima a las superficies reflejantes no son exactamente aleatorias, dando origen de esta manera a los fenómenos de interferencia. En base al autor, al integrar los modelos de interferencia en el volumen del recinto (ignorando los fenómenos sobre esquinas y bordes) se obtiene un término correspondiente al cociente entre la energía presente y la calculada a partir de mediciones de presión acústica en el centro del cuarto

$$k_c = 1 + \frac{S_{br}\lambda}{8V_r} \quad (3.105)$$

la cual en forma logarítmica está dada por la ecuación (3.101) y es conocida como corrección de Waterhouse. Aunque en el apéndice 2 del trabajo original de Waterhouse⁴⁶ menciona un término extra a la ecuación (3.101), el cual Uosukainen⁸⁵ sugiere sea incluido en la corrección de Waterhouse, la cual queda de la siguiente manera

$$k_c = 1 + \frac{S_{br}\lambda}{8V_r} + \frac{L\lambda^2}{32\pi V} \quad (3.106)$$

donde L es la longitud total de las dimensiones lineales del recinto. Lyon consultado por Uosukainen⁸⁵, expresa la densidad modal del recinto dada por la ecuación (3.68) multiplicada

por la corrección de Waterhouse dada por la ecuación (3.106), conduciendo de esta manera a que la corrección de Waterhouse es proporcional a la densidad modal

$$k_c = \frac{c^3 n}{4\pi V f^2} \quad (3.107)$$

Prácticamente, la forma mejorada de la corrección de Waterhouse dada por la ecuación (3.106) normalmente difiere de la corrección tradicional dada por la ecuación (3.105) a frecuencias menores de 100 Hz en bandas de tercios de octava⁸⁵.

En el caso del método convencional, donde la medición está en base a la norma ISO 140-3⁶⁰, la potencia transmitida es estimada con la ecuación (3.97), donde la absorción acústica equivalente del cuarto debe ser determinada como

$$A_r = \frac{24 \ln(10) k_c V_r}{c T_{60}} \quad (3.108)$$

De donde Uosukainen⁸⁵ concluye que la corrección no debe ser aplicada a la absorción acústica equivalente para que el resultado sea independiente de la geometría del recinto de medición. Aunque generalmente se aplica la corrección de Waterhouse, por lo que el índice de reducción de ruido es sobreestimado a bajas frecuencias. Y en base a la definición de la potencia acústica en el cuarto fuente dada por la ecuación (3.96), no es necesario aplicar la corrección de Waterhouse. En la determinación del SRI bajo la técnica de intensidad acústica, la potencia acústica transmitida es determinada a partir de mediciones de intensidad, por lo que no es necesario aplicar la corrección de Waterhouse.

3.4.4 Comparación entre la técnica de presión e intensidad acústica

En la tabla 1 se muestran las ventajas y desventajas del método de intensidad acústica para determinación del aislamiento acústico con respecto al método de presión. El método de intensidad acústica tiene varias ventajas sobre el método convencional, y la primera de ellas es que no se requiere un laboratorio con demasiadas exigencias, siempre y cuando se mantenga el SRI máximo medible. El laboratorio consiste de un cuarto reverberante como recinto emisor y un cuarto ordinario como recinto receptor. La segunda ventaja es que la intensidad acústica radiada por diferentes partes de la muestra de prueba puede ser determinada; además, permite

obtener mapas del flujo de energía acústica a través de la muestra de prueba, lo cual permite fácilmente localizar fugas de sonido. La tercera ventaja es que el método de intensidad puede ser aplicado para determinar la potencia acústica por flaqueo, la cual es toda aquella debida a otras superficies que no son parte de la muestra de prueba. Asimismo, existe la posibilidad de determinar el índice de reducción de ruido tanto en condiciones de laboratorio como *in situ*.

Una desventaja bastante clara del método de intensidad es que el equipo de medición debe cumplir ciertas especificaciones⁵⁹ y el personal encargado de la medición debe tener cierta habilidad y experiencia para obtener resultados confiables. El tiempo de medición depende del tamaño de la muestra de prueba, y del método de medición (puntos discretos o por escaneo). La determinación del índice presión-intensidad residual tiene que ser determinado antes de cada medición para asegurar que el equipo de medición cumple con lo especificado en la norma IEC 61043⁵⁹.

En el procedimiento del método convencional, el nivel de presión acústica debida a flaqueo debe ser al menos 10 dB menor que el nivel de presión acústica dado por la transmisión a través de la muestra de prueba. Tanto en el método convencional como en la técnica de intensidad, el flaqueo y el ruido de fondo definen el valor más alto medible del índice de reducción de ruido. Sin embargo, el flaqueo puede despreciarse durante las mediciones de intensidad al aplicar los criterios establecidos en la norma ISO 9614-1⁷. Van Zyl et al⁵¹. han demostrado que el método de intensidad puede ser usado en ambientes de flaqueo donde el método convencional falla totalmente, mientras la superficie de medición cubra completamente la muestra de prueba.

Tabla 1. Ventajas y desventajas del método de presión e intensidad acústica para la determinación del índice de reducción de ruido

Método de presión		Método de intensidad	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas

Técnicas de estimación de aislamiento acústico

Rápido y sencillo	Incertidumbre de medición alta	Necesidad de un cuarto reverberante	Determinación de varios indicadores de campo
Bien conocido	Necesidad de dos cuartos reverberantes	El método de puntos discretos permite la localización de fuentes sonoras	No aplicable para muestras de prueba absorbentes
	Cuartos reverberantes aislados estructuralmente	No es necesaria la medición del tiempo de reverberación	Necesaria la calibración en intensidad acústica
		Permite la determinación de trayectorias de flanqueo	Equipo de alto costo
		Muestras pequeñas pueden ser medidas	
		Incertidumbre de medición pequeña	
		Aislamiento de los cuartos menos exigente	

Las fuentes de error comunes en las mediciones son la escasa difusividad y el tiempo de reverberación no uniforme en el recinto fuente, repercutiendo de cierta manera en la exactitud de las mediciones. Es bien sabido que la incertidumbre de medición para las mediciones del SRI por el método convencional es más alta a bajas frecuencias que aquellas para la técnica de intensidad, debido a que los cuartos reverberantes son pequeños comparados con la longitud de onda^{58,61}. Con el método de intensidad solamente la potencia acústica incidente es determinada indirectamente usando la ecuación (3.96), mientras que la potencia acústica transmitida es determinada directamente, lo cual conduce a una menor incertidumbre de medición.

Hasta ahora varias investigaciones concernientes a la diferencia entre el método de presión e intensidad acústica para la determinación del aislamiento acústico han sido publicadas^{4-6,43,47,52,86}. Generalmente, el método de intensidad arroja valores más pequeños del SRI que el método convencional a bajas frecuencias, y valores más altos a altas frecuencias.

4. Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

Las mediciones bajo condiciones de laboratorio se realizaron en la cámara de transmisión del CCADET-UNAM, y las mediciones *in situ* en las instalaciones del Centro Nacional de Metrología. Para las mediciones tanto en laboratorio como *in situ* se emplearon cuatro diferentes materiales ligeros conformados como particiones dobles con un espacio de aire entre los paneles de 6 cm.

En el presente apartado se describe la cámara de transmisión del CCADET-UNAM, así como las instalaciones del CENAM donde se llevaron a cabo las mediciones del índice de reducción de ruido para las cuatro diferentes particiones. De la misma manera se describe el equipo empleado en las mediciones, la partición y su montaje, el método de calibración de campo usado, y la discretización de la superficie de medición empleada para cada uno de los métodos (laboratorio e *in situ*).

Son mostrados, además, los resultados de las mediciones del SRI bajo condiciones de laboratorio con sus diferentes variantes: espaciador entre micrófonos, distancia muestra-sonda, discretización de la superficie de medición, posición del material acústico dentro del recinto receptor, repetibilidad de las mediciones y corrección a bajas frecuencias. Los valores del SRI bajo condiciones *in situ* son mostrados para las mismas variantes, excepto aquella relacionada a la discretización de la superficie de medición y la posición del material acústico dentro del recinto receptor, dado que en este caso el recinto usado como receptor es una cámara semianecoica.

Finalmente, se presenta la comparación entre el SRI para condiciones de laboratorio y el SRI bajo condiciones *in situ* para las diferentes variantes.

4.1 Infraestructura empleada y particiones de prueba

Se describe la cámara de transmisión del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); así como las instalaciones del Centro Nacional de Metrología usadas para las mediciones *in situ* del índice de reducción de ruido. De la misma manera, se muestran las características de las particiones de prueba.

Tanto para las condiciones de laboratorio como *in situ*, se muestran las condiciones de montaje de las particiones.

4.1.1 Método de laboratorio

Las mediciones del índice de reducción de ruido por el método convencional se llevan a cabo en la cámara de transmisión del CCADET-UNAM una vez que ésta fue caracterizada conforme a la norma ISO 140 parte 1 y 3^{3,60,87}. A partir de la caracterización de dicha cámara se encontraron determinadas posiciones de la fuente sonora, las cuales fueron empleadas para las mediciones del índice de reducción de ruido de diversas particiones por la técnica de intensidad acústica conforme a la norma ISO 15186-1⁸.

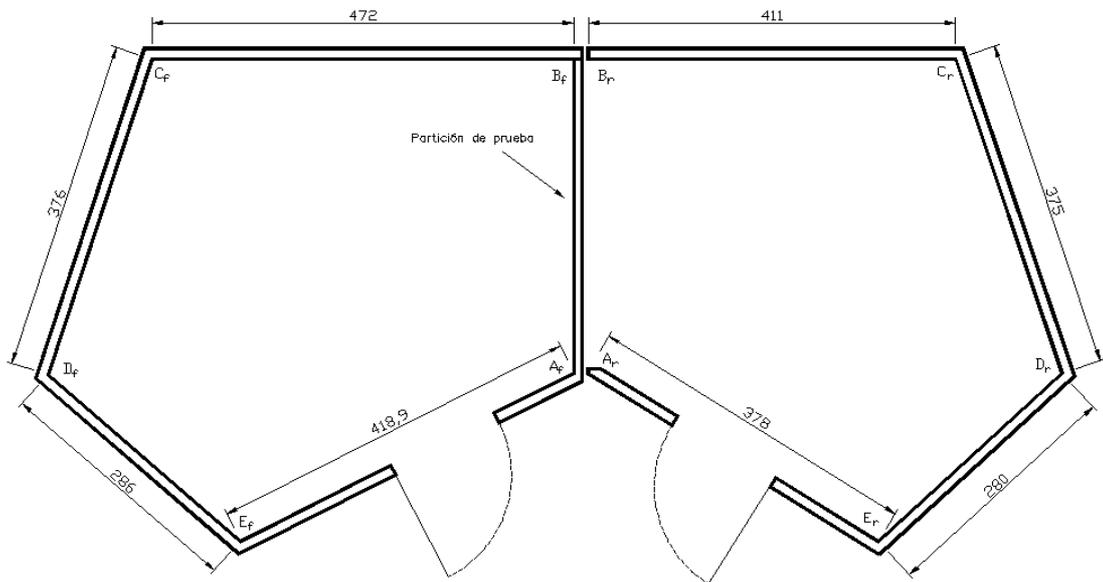
4.1.1.1 Descripción de la cámara de transmisión

La norma ISO 15186-1⁸ menciona que los requerimientos del recinto emisor y la abertura de prueba debe ser aquella mencionada en la norma ISO 140-1³, y para el cuarto receptor, el indicador de campo F_2 debe estar dentro de lo especificado por la norma ISO 15186-1⁸, tal y como se especifica en la sección 3.4.2 de esta tesis. En base a la norma ISO 140-1³, los volúmenes de los cuartos de la cámara de transmisión deben ser al menos de 50 m³, y una diferencia de al menos 10% en los volúmenes y/o dimensiones es recomendada.

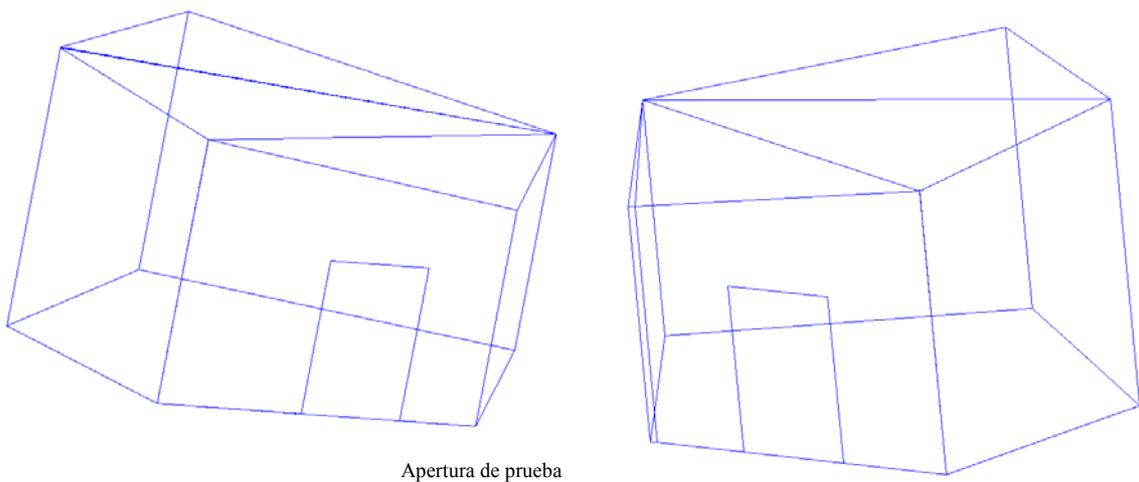
La cámara de transmisión del CCADET-UNAM consta de dos cuartos reverberantes contruidos con muros y losa de concreto con armado de acero de 30 cm y , respectivamente. Para evitar la transmisión estructural de un recinto a otro, estos se encuentran asilados estructuralmente entre si, y se encuentra cada uno suspendido sobre amortiguadores. Las dimensiones interiores de la cámara de transmisión se muestran en la figura 6, y el área de prueba para la partición es de 351 cm x 284 cm (longitud x altura). Con la partición de prueba montada, el volumen del recinto emisor y receptor es de 79,27 m³ y 71,05 m³, respectivamente. Como se puede observar, dicha cámara de transmisión tiene una forma irregular con el fin de aumentar la difusividad del campo acústico; es decir, ninguna de las superficies de cada uno de los recintos es paralela a otra. La altura interior de cada uno de los puntos de los cuartos reverberantes son:

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

Punto en el cuarto emisor	Altura, cm	Punto en el cuarto receptor	Altura, cm
A _f	284,0	A _r	284,0
B _f	284,0	B _r	284,0
C _f	339,0	C _r	339,0
D _f	365,5	D _r	369,0
E _f	345,0	E _r	343,0



(a) Vista superior



(b) Otras vistas

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

Figura 6. Dimensiones interiores de la cámara de transmisión del CCADET-UNAM. Dimensiones y volúmenes con la partición de prueba montada. Acotaciones en cm.

El cuarto reverberante de mayor volumen es el empleado como emisor en las mediciones de las cuatro particiones de prueba, en el cual se definieron cuatro posiciones de la fuente sonora y la trayectoria del *boom* giratorio a partir de la caracterización de la cámara de transmisión⁸⁷. La caracterización de la cámara de transmisión contempló lo siguiente: (i) definición de la trayectoria del micrófono dentro de ambos recintos; (ii) definición del número de posiciones y ubicaciones de la fuente sonora; y (iii) medición del tiempo de reverberación de ambos recintos, el cual debe cumplir al condición $1sT_{60} 2(V/50)^{2/3} s$ en base a la norma ISO 140-1³. Para el ajuste del tiempo de reverberación para cada una de las particiones de prueba, se adicionó material absorbente dentro del cuarto emisor, tal y como se indica en la figura 7.

Las ubicaciones de las posiciones de la fuente sonora y el plano de giro del *boom* giratorio dentro del recinto emisor son mostradas en la figura 8. Para las mediciones del índice de reducción de ruido por la técnica de intensidad acústica se emplearon las posiciones de la fuente sonora indicadas en la figura 8, y la trayectoria del micrófono indicada fue usada para las mediciones de los niveles de presión acústica.



(a) Material acústico en la cámara emisora.

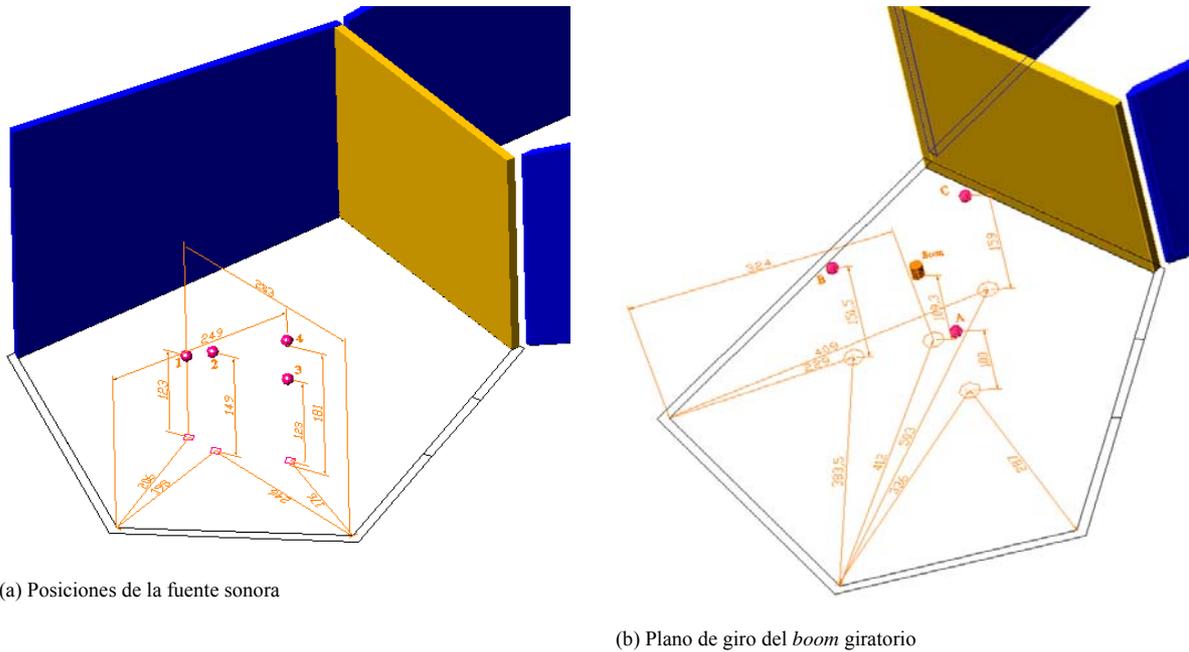


(b) Paneles acústicos en la cámara emisora.



(c) Paneles acústicos en el recinto emisor y ubicación de la fuente sonora y el boom giratorio.

Figura 7. Ubicación del material absorbente dentro del cuarto emisor para conseguir el tiempo de reverberación sugerido por la norma ISO 140-1



(a) Posiciones de la fuente sonora

(b) Plano de giro del boom giratorio

Figura 8. Posiciones de la fuente sonora y plano de giro del boom giratorio dentro del recinto emisor. Acotaciones en cm.

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

Para reducir la reverberación del recinto receptor, y por tanto reducir la componente reactiva de la intensidad acústica, se adicionó material absorbente, consiguiéndose tiempos de reverberación menores a 0,5 s en el intervalo de frecuencia de interés, ver figura 9. Finalmente, en base al estudio de caracterización de la cámara de transmisión, se encontró que la frecuencia de corte de la misma es de 200 Hz⁸⁷.



Figura 9. Ubicación del material absorbente dentro del recinto receptor

4.1.1.2 Descripción y montaje de las particiones de prueba

El área de la partición para la medición del índice de reducción de ruido por el método de laboratorio tiene un área de 9,97 m². Tanto para el método de laboratorio como *in situ* las particiones de prueba se conformaron como una muestra doble con un espaciamiento entre paneles de 6 cm dado por una canaleta de metal. Las características de los cuatro materiales medidos se muestran en la tabla 2. A partir de la tabla 2 se observa que estos materiales son considerados como ligeros. Las dimensiones comerciales de los paneles son 122 cm x 244 cm x 1,2 cm.

Tabla 2. Características de los materiales de prueba

Etiqueta asignada	Nombre comercial	Densidad superficial, kg/m ²
Muestra A	Permabase	12,30
Muestra B	-----	12,23
Muestra C	Tablaroca	7,74
Muestra D	Cempanel	15,21

Debido a que la apertura de prueba de la cámara de transmisión del CCADET-UNAM es de un área mucho mayor que el área de los paneles de prueba, se montó una estructura con las canaletas para cubrir toda el área, ver figura 10. Posteriormente, los paneles fueron montados sobre el lado del recinto receptor y emisor por medio de pijas, dando un espesor promedio de la partición de prueba de 9 cm.

El montaje de la partición sobre la apertura de prueba del recinto emisor estuvo a cargo de personal con amplia experiencia en ello.

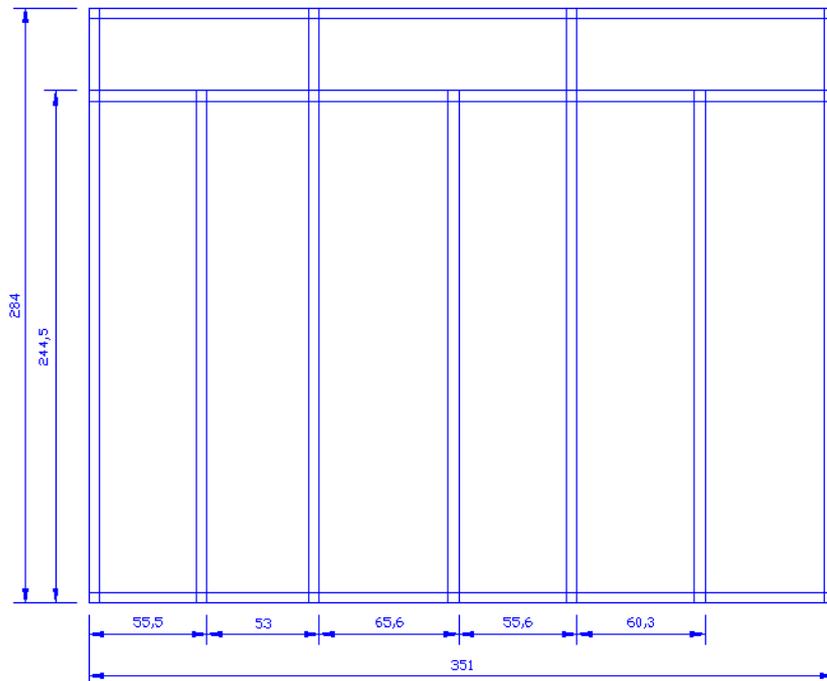


Figura 10. Estructura para montaje de los paneles de prueba en la apertura de prueba de la cámara de transmisión del CCADET-UNAM. Acotaciones en cm.

4.1.2 Método *in situ*

Las mediciones del índice de reducción de ruido conforme a la norma ISO 15186-2⁸¹ se llevan a cabo en el laboratorio Sala Sono-amortiguada de la División de Vibraciones y Acústica del Centro Nacional de Metrología. Estas instalaciones se consideran un método *in situ* debido a que el cuarto usado como emisor no cumple con los requerimientos de volumen especificados

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

en la norma ISO 140-1³, y el área de la partición de prueba es mucho menor que la requerida por la norma ISO 140-3⁶⁰. La fuente sonora, el tipo de señal empleada y las posiciones de la fuente sonora dentro del recinto emisor deben cumplir con los requerimientos sugeridos en la norma ISO 140-4⁸³.

En este apartado se describen las instalaciones usadas para las mediciones del SRI bajo el método in situ; así como una descripción del montaje de la partición doble de prueba. Un aspecto importante a tomar en cuenta en estas instalaciones es el nicho creado por las superficies del recinto usado como receptor.

4.1.2.1 Descripción de las instalaciones empleadas

El laboratorio Sala Sono-amortiguada esta formado por un cuarto de paredes de concreto paralelas entre si y techo de concreto paralelo al piso; sin embargo, la altura del techo es reducida por un plafón de fibra de vidrio. Este cuarto, que fue usado como recinto emisor, cuenta en su interior con muebles y equipo, los cuales no fueron retirados durante las mediciones, ver figura 11. Como cuarto receptor se usó la cámara semi-anecoica, la cual tiene una frecuencia de corte de 630 Hz⁸⁸. Ambos recintos forman parte del edificio y no se encuentran aislados estructuralmente; es decir, en principio el problema de flanqueo podría ser importante en la medición del índice de reducción de ruido. Las dimensiones interiores de las instalaciones para el método in situ se muestran en la figura 11, y el área de la partición de prueba es de 88 cm x 196,5 cm (longitud x altura). Con la partición de prueba montada, y restando el volumen de los muebles y equipos que se encuentran dentro del recinto usado como emisor, el volumen de éste es de 32,34 m³. El volumen efectivo de la cámara semi-anecoica es de 88,8 m³, y el del nicho creado es de 1,08 m³. La altura del techo tanto del recinto emisor como del receptor es de 3 m. Para cumplir con la especificación que indica la norma ISO 15186-2⁸¹ respecto a que las paredes que forman el volumen del nicho deben ser rígidas acústicamente, se colocó una pared de madera de 1,2 cm de espesor, tal y como se indica en la figura 10 y 11, quedando de manifiesto que las paredes del nicho están formadas por materiales de diferente coeficiente de absorción acústica (concreto y madera). Una de las potenciales fuentes de flanqueo es la pared de madera que se encuentra sobre la partición de prueba, ver figura 10 y 11.

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad



(a) Posición del boom giratorio y la fuente sonora



(c) Montaje de la partición de prueba



(b) Apertura de prueba y posición del boom giratorio



(d) Cámara semi-anechoica usada como recinto receptor

Figura 10. Recintos usados para la medición del índice de reducción de ruido por el método in situ

Las posiciones de la fuente sonora, y el plano y radio de giro del boom giratorio se estableció de la forma como lo establece la norma ISO 140-4⁸³; es decir, las posiciones de la fuente sonora se ubicaron con respecto a cualquier punto de la trayectoria del micrófono, las superficies del recinto emisor y la partición de prueba tal y como se sugiere en la norma, ver figura 12. La ubicación de la fuente sonora es con respecto a su centro geométrico, y el plano de la trayectoria del micrófono se obtiene a partir de tres puntos arbitrarios de la trayectoria del boom giratorio.

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

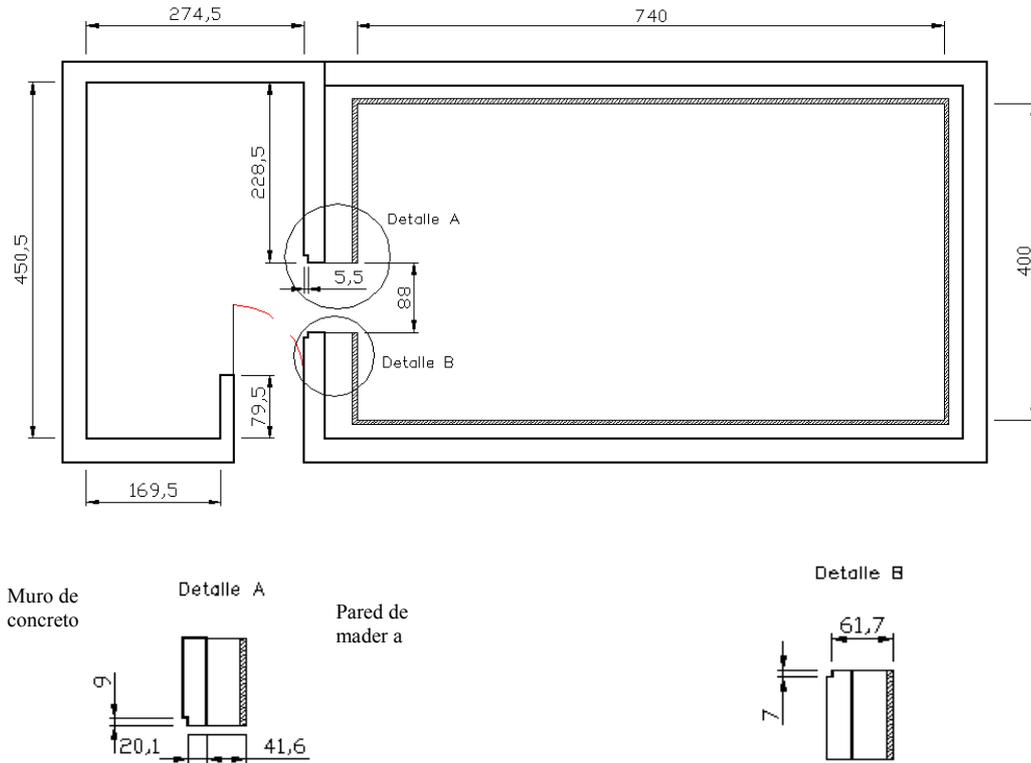
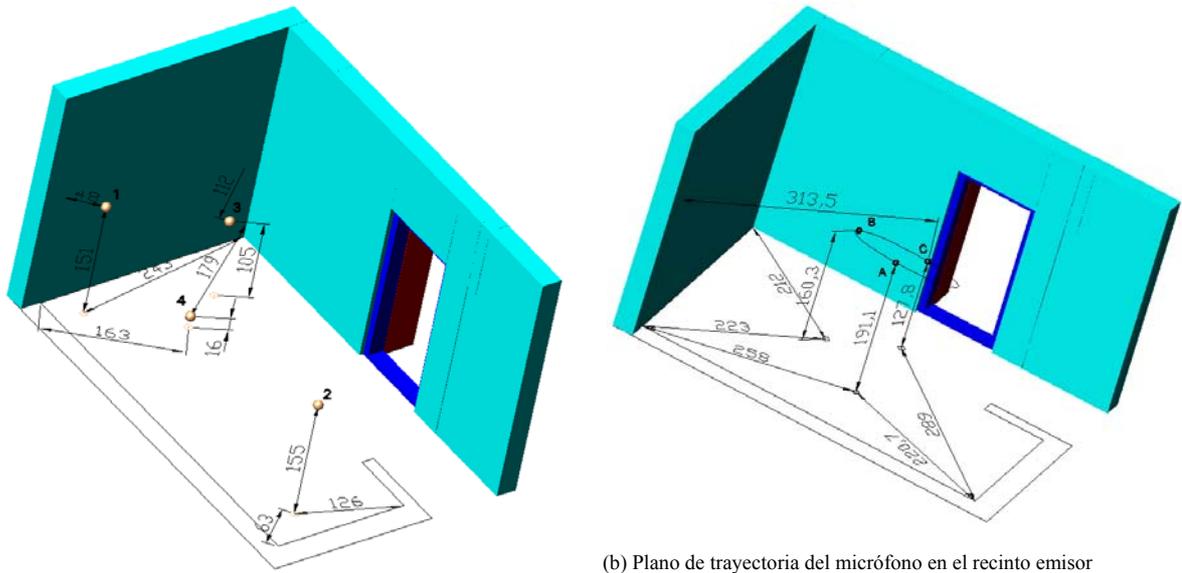


Figura 11. Dimensiones interiores de los recintos del CENAM para mediciones in situ del SRI. Acotaciones en cm.



(a) Posiciones de la fuente sonora

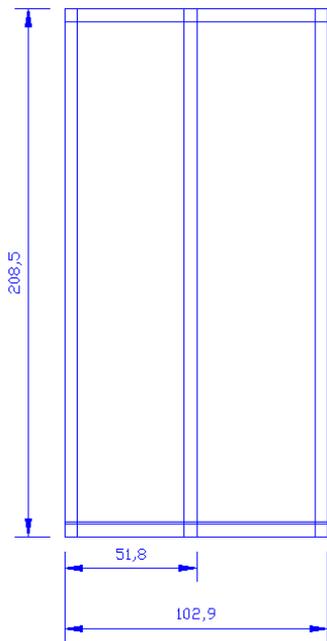
(b) Plano de trayectoria del micrófono en el recinto emisor

Figura 12. Posiciones de la fuente sonora, y plano de giro del boom giratorio indicado por tres puntos de la trayectoria. Acotaciones en cm

4.1.2.2 Montaje de la partición

El área de de la partición de prueba para el método *in situ* es de 1.73 m², lo que corresponde a un 17,3 % del área de la partición de prueba recomendada por la norma ISO 140-3. Los paneles probados son aquellos indicados en la sección 4.1.1.2 de este documento, y en la medida de lo posible se trató de conformar la partición de prueba con una estructura de soporte similar a la de un área donde se encontraba montado un panel de dimensiones originales (122 cm x 244 cm) en la partición de 10 m², ver figura 13. La estructura de soporte de los paneles es una canaleta similar a la empleada para la muestra de 10 m², por lo que el espacio entre paneles (espacio de aire) se mantuvo en 6 cm.

Además de las variantes, con respecto a la medición en laboratorio con base a la norma ISO 140-3⁶⁰, del tamaño de la muestra y por tanto de la estructura de soporte de los paneles, se tuvo otra muy importante y que es la relacionada al montaje de la partición en la apertura de prueba. Debido a que las instalaciones para el método *in situ* se están evaluando para la medición del índice de reducción de ruido empleando la técnica de intensidad acústica, no se consideró pertinente realizar una modificación de fondo al área destinada para el montaje de la partición de prueba. Por tanto, la alternativa más viable fue el emplear tuercas mariposa para sujetar a la muestra, y montar una ventosa entre la apertura de prueba y la partición para en principio evitar flanqueo por esa vía. En la figura 10.b se muestran las tuercas mariposa y las ventosas, y en la figura 10.c se muestra la partición montada y sujeta con las tuercas mariposas ejerciendo presión sobre la ventosa. Debido al espesor de esta, la partición no toca la pared de la apertura de prueba, creándose un volumen entre ambas y, por tanto, incrementando el ancho de la pared del nicho, ver figura 13.



(b) Montaje en la parte inferior

(a) Estructura para montaje de los paneles para la partición doble.

Acotaciones en cm.

Figura 13. Detalle del montaje de la partición. Volumen creando entre ésta y la apertura de prueba.

4.2 Equipo empleado, y su calibración

Un micrófono de condensador (de aquí en adelante será referido como micrófono) es un transductor acústico para mediciones de sonido y ruido con una alta exactitud, empleado ya sea en condiciones de laboratorio o industriales. En base a su respuesta en el campo acústico, los micrófonos se dividen en micrófonos de presión, de campo libre y de campo difuso. Los campos de presión pueden ser encontrados en cavidades con volúmenes pequeños comparados con la longitud de onda; por ejemplo, el acoplador de un pistófono.

Una característica importante de los micrófonos de medición es su *sensibilidad en circuito abierto*, la cual especifica la tensión eléctrica de salida esperada en la terminal de salida (terminal eléctrica) de un micrófono para cada unidad de presión acústica que actúa sobre el diafragma (terminal acústica) -cuando el micrófono no está montado sobre un preamplificador. Para un transductor, la sensibilidad es medida en términos de las unidades de la salida eléctrica

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

por unidad del parámetro físico de entrada. Así, la sensibilidad de un micrófono está generalmente definida en términos de Volts por Pascal (V/Pa).

La sensibilidad en presión se refiere solamente a la presión sobre el diafragma, y la sensibilidad en campo libre y campo difuso son definidas cuando la presión es aplicada al diafragma y a la ventana de ecualización de la presión.

La *calibración* de un micrófono, por ejemplo, comprende la estimación de su sensibilidad y la respuesta en frecuencia. Existen diferentes definiciones de calibración, pero aquí se entenderá como la comparación entre dos instrumentos o transductores de medición (micrófonos, acelerómetros, etc), uno usado como patrón con una exactitud conocida y que es trazable a patrones nacionales, y el otro es considerado como el transductor bajo prueba.

La exactitud de los parámetros medidos en la calibración debe ser conocida; es decir, el equipo y el método usado para calibrar un micrófono deben dar un valor de incertidumbre asociada a la sensibilidad. Cuando estas condiciones se cumplen, se dice que la calibración es trazable debido a que esta puede decirse que está en base a las unidades fundamentales de medición. Por tanto, los parámetros reportados en una calibración deben estar asociados a una incertidumbre de medición.

En el presente apartado se muestra la lista de equipo empleado durante las mediciones del índice de reducción de ruido tanto en condiciones de laboratorio como *in situ*. Además, se describe brevemente la calibración de la sonda de intensidad.

4.2.1 Equipo de medición

En la tabla 1 se muestran los instrumentos empleados para la realización de las mediciones del índice de reducción de ruido tanto para condiciones de laboratorio como *in situ*; así como aquellos usados para la determinación del tiempo de reverberación del recinto emisor en las instalaciones del CENAM. Es conveniente mencionar que el micrófono empleado para medir los niveles de presión acústica en el recinto usado como emisor, Norsonic 1220, corresponde a un micrófono de “campo libre” y no “campo difuso”. Sin embargo, la diferencia entre ambas sensibilidades (sensibilidad en campo libre y sensibilidad en campo difuso) informadas por el fabricante es mínima en el intervalo de frecuencia de interés (250 Hz a 5 kHz) y su efecto se

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

considera dentro de la incertidumbre de medición. Además, el micrófono empleado es calibrado en presión en el CENAM; es decir, es determinada su sensibilidad en presión, y ésta es muy similar a la sensibilidad en campo difuso según la carta de calibración original del fabricante.

Tabla 3. Instrumentación empleada para las mediciones del índice de reducción de ruido por el método de laboratorio e *in situ*.

Instrumento	Marca	Modelo
Analizador de señal	Brüel & Kjær	2144
Fuente sonora omnidireccional (dodecaedro)	S/M	S/M
Fuente de referencia	Brüel & Kjær	4204
Micrófono	Norsonic	1220
Preamplificador p/micrófono	Norsonic	1201
Pistófono	Brüel & Kjær	4228
Boom giratorio	Brüel & Kjær	3923
Ecuador	DOD	231
Preamplificador	Gemini	P.A.-700
Dual channel filter	Stanford research systems Inc.	SR 650
Generador de ruido	Brüel & Kjær	1405
Analizador de señal	Brüel & Kjær	2035
Fuente sonora	B&W	805 Matrix
Calibrador de intensidad	Brüel & Kjær	3541
Sonda de intensidad	G.R.A.S.	50AI
Micrófonos	Brüel & Kjær	4197 parte 1 y 2
Tarjeta	National Instruments	NI GPIB-USB-HS
Termohigrómetro	Cole-Parmer	37950-03
Laptop	Toshiba	Satellite Pro 4200 series

Pérez⁸⁹ menciona que la fuente sonora omnidireccional es estable y tiene una respuesta en frecuencia conforme a lo sugerido en la norma ISO 140-3⁶⁰ en el intervalo de frecuencia de 200 Hz a 6,3 kHz.

Para las mediciones del SRI bajo el método de laboratorio, se empleó la fuente sonora omnidireccional y el generador de ruido B&K 2035. Asimismo, para las mediciones *in situ* se usó la fuente de referencia B&K 4204. En ambos métodos, se utilizó el *boom* giratorio para las

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

mediciones de los niveles de presión acústica en el recinto emisor, con un tiempo de 64 s por revolución. Para cada una de las posiciones de la fuente sonora se registraron 40 espectros con un tiempo de promediación de 16 s cada uno; es decir, por cada revolución del *boom* giratorio el analizador de señal almacenó 4 espectros.

La configuración del analizador de señal B&K 2144 empleado para la medición de los niveles de presión acústica en el recinto emisor tanto para el método de laboratorio como *in situ* fué:

Tipo de medición	Autoespectro
Intervalo de frecuencia	20 Hz a 10 kHz
Tipo de promediación	Lineal
Tiempo de promediación	16 s.
Ancho de banda	1/3 de octava.
Ponderación en frecuencia	Lineal.
Número de espectros	40

Para la determinación del tiempo de reverberación en el recinto usado como emisor en las instalaciones del CENAM es:

Tipo de medición	Autoespectro
Intervalo de frecuencia	20 Hz a 10 kHz
Tipo de promediación	Exponencial
Tiempo de promediación	1/16 s.
Ancho de banda	1/3 de octava.
Ponderación en frecuencia	Lineal.
Número de espectros	55

Para la medición de intensidad acústica el analizador de señal se configuró de la siguiente manera:

Tipo de medición	Análisis por intensidad
Intervalo de frecuencia	20 Hz a 12,5 kHz
Tipo de promediación	Lineal
Tiempo de promediación	12 s.
Ancho de banda	1/3 de octava.

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

Ponderación en frecuencia	Lineal.
Número de espectros	Depende de la discretización

Para la medición de la intensidad acústica, en cada uno de los puntos de la superficie de medición, se realizó un programa en matlab para comunicarse desde una laptop vía la tarjeta **adquisitora** con el analizador de señal B&K 2144. Una de las variables en la medición de intensidad fue el espaciador para micrófonos, usando el de 12 mm y 50 mm, para cubrir el intervalo de frecuencia de 200 Hz a 8 kHz. Además, el procesamiento de todas las mediciones se realizó con un programa en matlab.

4.2.2 Calibración de la sonda de intensidad por el método del acoplador

Las razones de la calibración de una sonda son: (i) asegurar la funcionalidad del equipo; (ii) comprobar que cumple con lo especificado por la norma IEC 61043⁵⁹; (iii) verificar la estabilidad de los micrófonos y preamplificadores que componen la sonda de intensidad; y (iv) conocer la respuesta del equipo a diferentes condiciones ambientales.

Cuando la calibración de un micrófono se realiza en campo usando un calibrador acústico con una frecuencia de referencia, ese valor de calibración solo es válido a esa frecuencia, y no puede considerarse para todo el intervalo de medición, solo en aquellos casos donde la respuesta a la frecuencia del micrófono es plana en todo el intervalo de frecuencia de interés.

Por otra parte, los métodos de calibración de laboratorio son de una exactitud más alta que los métodos de campo debido al equipo usado y a las condiciones ambientales controladas.

El equipo empleado en las mediciones del índice de reducción de ruido es calibrado en laboratorio cada año en los laboratorios del CENAM, y se expide su certificado de calibración.

Como ya se comentó en la sección 3.1.2 de esta tesis, una de las fuentes de error más importantes en la medición de intensidad acústica por el principio de dos micrófonos, es el desfase existente entre las cadenas de medición de la sonda de intensidad.

La calibración en laboratorio, conforme al procedimiento establecido en CENAM, de la sonda de intensidad incluye dos partes:

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

- i) Evaluación del desfase entre los micrófonos y entre las cadenas de medición micrófono-preamplificador en el intervalo de frecuencia de 50 Hz a 1 kHz;
- ii) Determinación de la sensibilidad en presión de los micrófonos a la frecuencia de 250 Hz, y medición de la respuesta en frecuencia de ambos micrófonos en el intervalo de 20 Hz a 10 kHz.
- iii) Determinación del factor de corrección por presión de los micrófonos.

La medición del desfase entre micrófonos y las cadenas de medición se llevó a cabo por medio del método del acoplador. En la figura 14 se muestra el acoplador usado, el cual es parte de calibrador de intensidad B&K 3541. Brevemente, la peculiaridad de este acoplador es que cuando el pistófono es montado sobre la cámara superior del acoplador, existe una diferencia de fase entre las presiones acústicas de la cámara superior e inferior. Además, la amplitud de la presión acústica es la misma en ambas cámaras, lo cual propicia una onda plana propagándose en un campo libre simulado. Cuando los micrófonos son montados en los puertos de la cámara superior, son expuestos a la misma presión acústica (magnitud y fase)³⁷. Esta propiedad permite medir el desfase entre los micrófonos o las cadenas de medición de la sonda.

A partir de la definición del índice presión-intensidad residual, el cual en una forma sencilla se puede interpretar como el desfase de la cadena de medición del sistema de intensidad expresado en dB, es posible medir el desfase entre micrófonos excitándolos acústicamente con señales discretas en lugar de usar ruido rosa en todo el intervalo de frecuencia de interés³⁷.

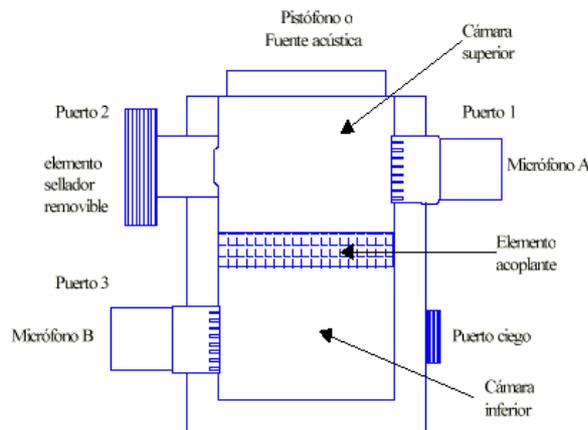


Figura 14. Acoplador del calibrador de intensidad B&K 3541

Conociendo las sensibilidades de los micrófonos de la sonda y sus factores de corrección por presión estática, es posible llevar a cabo la calibración en campo de la sonda de intensidad, la cual consiste en: (i) determinación del nivel de presión e intensidad acústica, y nivel de velocidad de la partícula a la frecuencia de 250 Hz; y (ii) determinación del índice presión-intensidad residual. Para la calibración en el nivel de presión acústica se monta un pistófono en el acoplador de intensidad, y los micrófonos en los puertos superiores. Manteniendo el pistófono en el acoplador pero cambiando uno de los micrófonos al puerto inferior, es posible calibrar la sonda en cuanto al nivel de intensidad acústica y velocidad de la partícula para una distancia de 50 mm tal y como lo especifica el fabricante.

Para la determinación del índice presión-intensidad residual de la cadena de medición (micrófono-preamplificador-analizador de señal), se sustituye el pistófono por una fuente de ruido rosa. Una vez determinado este parámetro del sistema de medición de intensidad para cada uno de los espaciadores a emplear, se compara con los valores sugeridos por la norma IEC 61043⁵⁹ para verificar el cumplimiento o no con la clase requerida por la medición de intensidad.

La calibración en campo se debe realizar antes de iniciar las mediciones de intensidad, para posteriormente determinar la capacidad dinámica del equipo con base a la ecuación (3.43), la cual posteriormente se compara con el índice presión intensidad de la medición como parte del procedimiento para determinación de potencia acústica conforme a la norma ISO 9614-1⁷.

4.3 Discretización de la superficie de medición

La medición de intensidad acústica se realizó por puntos discretos conforme a la norma ISO 9614-1⁷ para la estimación del índice de reducción de ruido tanto para el método de laboratorio como *in situ*. La superficie de medición empleada para cada uno de los métodos se muestra en la figura 15 y 16, respectivamente.

Para el método de laboratorio, la superficie de medición se definió de la siguiente manera: (i) Para ubicar los puntos de medición de las líneas verticales, primeramente se encontró la línea central (horizontalmente) de la partición de prueba; (ii) en la línea central se ubica la primer línea vertical de la superficie de medición; (iii) a partir de la línea central, se trazan tanto a la izquierda como a la derecha 5 líneas verticales espaciadas 30 cm; (iv) para ubicar las líneas horizontales de la superficie de medición, se ubicó la línea central verticalmente de la partición de prueba; (v) se ubica la primera línea horizontal de la superficie de medición en la línea central; (vi) a partir de la línea central, se ubican tanto hacia arriba como hacia abajo 4 líneas horizontales espaciadas 30 cm. Este arreglo produce una malla de 11 líneas verticales por 9 horizontales; es decir, 99 puntos de medición.

Aunque cabe señalar que a la superficie de medición descrita se le adicionó una línea adicional después de la última línea tanto arriba como abajo, y a la izquierda como a la derecha, a una distancia de 15 cm después de la última línea. Este arreglo produce una superficie de medición de 13 líneas verticales por 11 líneas horizontales; es decir, 143 puntos de medición. Esta superficie de medición fue la empleada en todas las mediciones de intensidad para el método de laboratorio. No obstante, para mostrar la importancia de la densidad de la discretización de la superficie de medición, ésta se definió a una distancia de 15 entre líneas, lo cual produjo una malla de 23 líneas verticales por 19 líneas horizontales.

Para el método *in situ*, la superficie de medición se definió de la misma manera que para el método de laboratorio, solo que en este caso debido a que el área de la partición de prueba es mucho menor (menor al 20% a la empleada en el método de laboratorio) se trazaron solo 7 líneas verticales por 15 líneas horizontales espaciados cada 13 cm, dando un total de 105 puntos de medición.

Figura 15. Discretización de la superficie de medición para el método de laboratorio

Figura 16. Discretización de la superficie de medición para el método in situ

4.4 Estimación del índice de reducción de ruido por el método de laboratorio

Esquivel⁹⁰, muestran las primeras mediciones para la estimación del índice de reducción de ruido por el método de presión y la técnica de intensidad acústica en la cámara de transmisión del CCADET-UNAM. Las muestras empleadas son materiales comunes en la construcción de viviendas en México, y la concordancia entre ambas técnicas es semejante a la encontrada por diversos autores^{4,6,42-44,47}. Una concordancia aceptable es encontrada en el intervalo de frecuencia de 250 Hz a 3,15 kHz.

En el presente apartado se muestra con detalle los resultados de la estimación del SRI por el método de laboratorio en la cámara de transmisión del CCADET-UNAM, haciendo énfasis en las diferentes variables consideradas: posición de la fuente sonora, espaciadores de los micrófonos, distancia muestra-sonda, discretización de la superficie de medición, posición del material absorbente dentro del recinto receptor, repetibilidad y corrección a bajas frecuencias.

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

Asimismo, se muestra la comparación de los resultados del índice de reducción de ruido obtenido por la técnica de intensidad y el método de presión o convencional.

Previo al inicio de las mediciones de intensidad acústica, la cadena de medición fue calibrada en campo tanto por presión como en intensidad acústica, y además, se obtuvo el índice presión-intensidad residual para la configuración del sistema de medición usado.

En base a la norma ISO 15186-1⁸, el equipo de medición (sonda de intensidad y analizador de señal), deben ser clase 1 conforme a la norma IEC 61043⁵⁹. En la tabla 4 se muestra el índice presión-intensidad residual del equipo de medición medido con el método del acoplador y aquel requerido por la norma IEC 61043, y el índice de capacidad dinámica del equipo considerando un grado de exactitud 2 (*Engineering*) $K = 10$. Los valores del índice de presión-intensidad residual reportados en la tabla 4 son un promedio de las mediciones de ese parámetro en cada partición evaluada.

Tabla 4. Índice presión-intensidad residual del equipo de medición empleado, y su índice de capacidad dinámica, para los espaciadores de 12 mm y 50 mm

Frecuencia Hz	Índice presión-intensidad residual, dB				Índice de capacidad dinámica dB	
	Medido		IEC 61043		dB	
	12 mm	50 mm	12 mm	50 mm	12 mm	50 mm
200	19,9	26,1	14,8	21,0	12,9	19,1
250	20,9	27,1	15,8	22,0	13,9	20,1
315	20,4	26,6	15,8	22,0	13,4	19,6
400	20,4	26,6	15,8	22,0	13,4	19,6
500	21,1	27,3	15,8	22,0	14,1	20,3
630	21,3	27,5	15,8	22,0	14,3	20,5
800	23	29,2	15,8	22,0	16	22,2
1000	20,3	26,5	15,8	22,0	13,3	19,5
1250	19,6	25,8	15,8	22,0	12,6	18,8
1600	18,7	24,9	15,8	22,0	11,7	17,9
2000	20,2	26,4	15,8	22,0	13,2	19,4
2500	19,6	25,8	15,8	22,0	12,6	18,8
3150	19,5	25,7	15,8	22,0	12,5	18,7
4000	19,2	25,4	15,8	22,0	12,2	18,4
5000	19,4	25,6	15,8	22,0	12,4	18,6

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

El tiempo de reverberación en el recinto emisor para cada una de las particiones de prueba, se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Tiempo de reverberación del recinto emisor para el montaje de las diferentes particiones de prueba.

Frecuencia Hz	Tiempo de reverberación para la partición de prueba, s			
	A	B	C	D
200	1,48	1,51	1,35	1,37
250	1,61	1,66	1,40	1,58
315	1,48	1,50	1,38	1,80
400	1,49	1,47	1,44	1,69
500	1,40	1,40	1,44	1,84
630	1,33	1,36	1,29	1,65
800	1,36	1,41	1,25	1,57
1000	1,35	1,47	1,31	1,52
1250	1,36	1,48	1,32	1,42
1600	1,48	1,51	1,33	1,49
2000	1,53	1,49	1,44	1,78
2500	1,53	1,52	1,45	1,81
3150	1,53	1,47	1,37	1,65
4000	1,39	1,46	1,27	1,35
5000	1,33	1,41	1,25	1,43

Las variables, y su nomenclatura, de la medición de intensidad para la estimación del índice de reducción de ruido en la cámara de transmisión del CCADET-UNAM son las siguientes:

Variable		Designación
Espaciador, mm	12	1
	50	2
Distancia muestra-sonda, cm	15	1
	20	2
	23	3
	29	4
Posición de la fuente sonora		1
		2
		3
		4

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

La designación del índice de reducción de ruido queda como R_{ijk} , donde i denota el espaciador entre micrófonos empleado, j la distancia muestra-sonda y k la posición de la fuente sonora dentro del recinto emisor.

4.4.1 Efecto de la posición de la fuente sonora

Las cuatro particiones de prueba fueron evaluadas en las cuatro posiciones de la fuente sonora indicadas en la figura 8, aunque no con los dos espaciadores para micrófonos ni para todas las distancias muestra-sonda. La comparación del SRI considerando la variable posición de la fuente sonora es mostrada a partir de mediciones de intensidad acústica con un espaciador de 12 mm y una distancia muestra-sonda de 20 cm y 23 cm para las muestras A y B, y C y D, respectivamente. En la tabla 6 y 7 se indica el indicador de campo presión-intensidad para cada una de las mediciones.

Los valores de R_1 , F_2 , F_3 , F_4 para las diferentes posiciones de la fuente sonora, y para cada una de las muestras fueron determinados a partir de las ecuaciones (3.100), (3.102), (3.103), (3.104), respectivamente. Es importante señalar que el índice de reducción de ruido es determinado sin considerar la corrección de Waterhouse, K_c , debido a que en este apartado se están comparando solo resultados del SRI obtenidos por medio de la técnica de intensidad acústica.

En la figura 17 se muestran los valores del SRI para las cuatros diferentes posiciones de la fuente sonora, y para cada una de las particiones de prueba.

Tabla 6. Indicador de campo F_2 para las particiones de prueba A y B, usando un espaciador de 12 mm y una distancia muestra-sonda de 20 cm

Frecuencia Hz	Partición A-Posición fuente sonora				Partición B-Posición fuente sonora			
	1	2	3	4	1	2	3	4
200	5,52	5,38	5,71	5,70	5,89	5,90	5,95	6,41
250	5,50	5,66	5,94	5,91	6,22	6,43	5,91	6,05
315	6,22	5,87	6,66	6,32	6,26	6,61	6,99	6,88
400	6,32	6,16	6,53	6,36	7,00	6,83	6,72	7,27
500	6,69	6,50	6,85	6,56	6,90	6,98	6,67	6,91
630	6,87	7,12	7,16	6,78	6,84	7,05	7,08	7,19

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

800	7,16	7,16	7,32	6,94	6,74	7,20	7,14	7,32
1000	7,08	7,37	7,24	7,18	6,73	7,27	7,05	7,71
1250	6,98	7,20	7,23	7,29	6,80	7,02	6,98	7,20
1600	7,24	7,26	7,60	7,32	6,59	6,85	6,84	7,04
2000	7,40	7,82	7,84	7,70	6,53	6,79	6,79	6,79
2500	7,11	7,24	7,99	7,10	6,22	6,45	6,46	6,57
3150	6,52	6,45	6,44	6,29	7,46	7,38	7,58	7,59
4000	5,97	5,90	5,90	5,85	5,60	5,59	5,58	5,63
5000	5,82	5,73	5,72	5,65	4,84	4,80	4,76	4,76
6300	5,88	5,63	5,71	5,52	5,51	5,53	5,36	5,49

Tabla 7. Indicador de campo F_2 para las particiones de prueba C y D, usando un espaciador de 12 mm y una distancia muestra-sonda de 23 cm

Frecuencia Hz	Partición C-Posición fuente sonora				Partición D-Posición fuente sonora			
	1	2	3	4	1	2	3	4
200	5,14	4,61	5,32	5,22	5,68	5,48	5,60	5,86
250	4,72	4,91	4,79	5,13	5,51	5,72	5,47	5,78
315	5,48	5,53	5,92	5,88	5,99	5,84	6,45	6,42
400	6,06	6,28	6,18	6,29	6,50	6,22	6,52	6,49
500	6,49	6,17	6,44	6,09	7,27	6,70	7,14	6,73
630	6,42	6,49	6,31	6,54	6,65	6,93	6,57	6,80
800	6,71	6,67	6,58	6,66	6,99	6,88	7,03	6,81
1000	6,57	6,52	6,41	6,65	6,79	6,63	6,89	6,86
1250	6,41	6,27	6,33	6,21	6,86	6,99	7,11	6,80
1600	6,36	6,16	6,25	6,27	7,08	6,90	7,01	6,95
2000	6,10	5,80	6,04	6,19	7,17	7,11	7,16	7,20
2500	7,62	7,29	7,53	7,47	7,15	6,76	6,77	6,98
3150	6,75	6,65	6,66	6,61	5,33	5,18	5,16	5,23
4000	4,83	4,88	4,88	4,86	3,55	3,68	3,57	3,57
5000	3,91	4,11	4,12	3,97	3,80	4,34	3,81	3,83
6300	4,90	5,00	5,13	5,14	4,18	5,52	4,12	4,25

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

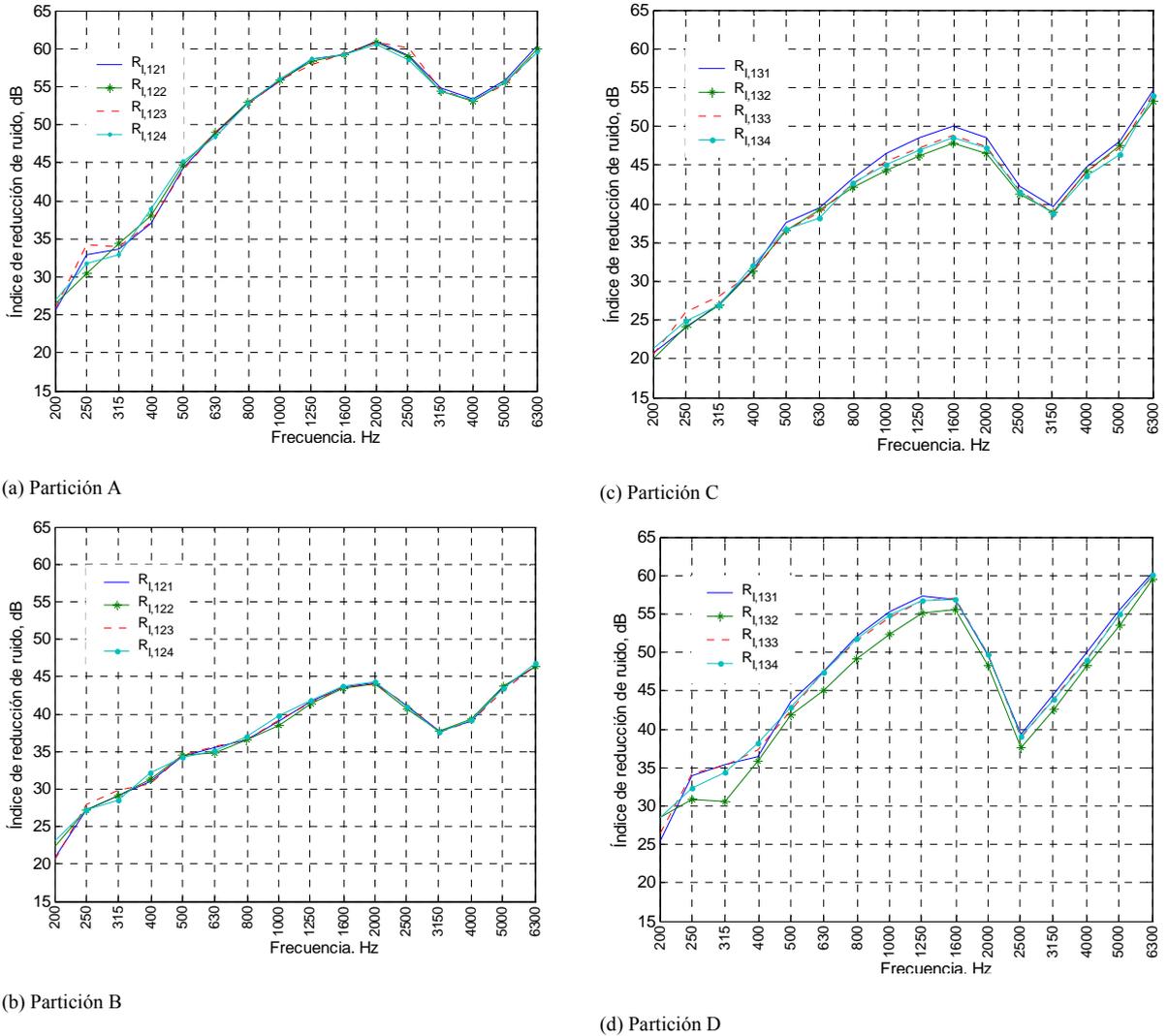


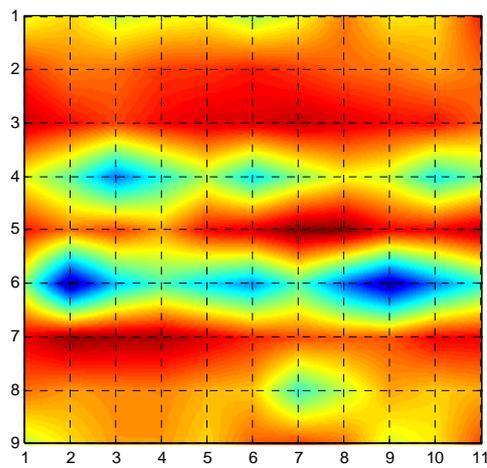
Figura 17. Índice de reducción de ruido para las cuatro posiciones de la fuente sonora indicadas en la figura 8, para cada una de las particiones de prueba

En el apéndice I se muestran los indicadores de campo F_3 , F_4 y el parámetro CF_4^2 de cada una de las posiciones de la fuente sonora, y para cada una de las particiones de prueba; asimismo, se indican los valores del índice de reducción de ruido para cada uno de estos casos. Así como la desviación estándar y valor promedio de las cuatro posiciones de la fuente sonora para cada una de las particiones de prueba.

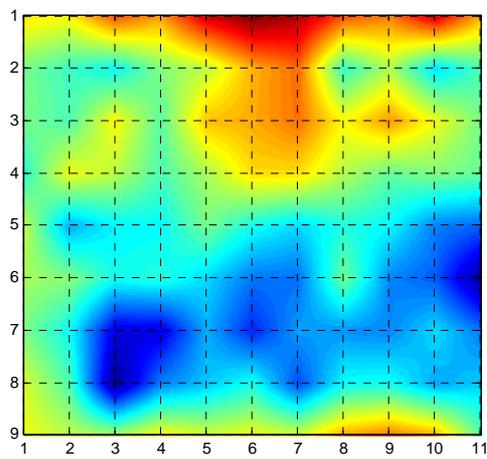
Para contar con mayor información respecto a la variación del SRI a diferentes posiciones de la fuente sonora para cada una de las muestras, principalmente en la partición D, en la figura 18 y 19 se muestran mapas de intensidad para las diferentes zonas de una partición doble (tal y

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

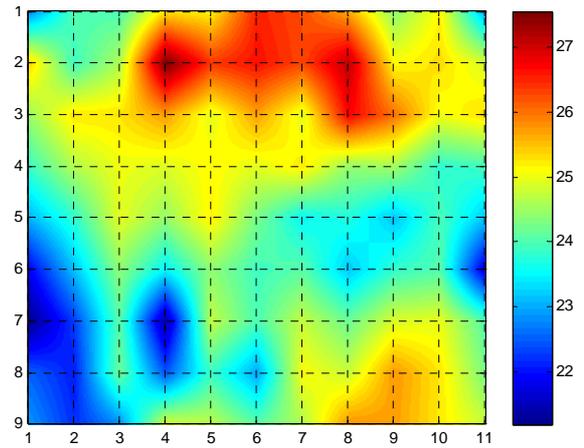
como se menciona en la sección 3.3.3 de esta tesis): 250 Hz y 630 Hz para el intervalo donde se cumple la ley de masas, 2,5 kHz para el intervalo de coincidencia, y 5 kHz para el intervalo arriba de la frecuencia de coincidencia. En las figura 18 se muestran los mapas de intensidad para las posiciones 2 y 3 de la fuente sonora dentro del recinto emisor de la partición A, y lo mismo se hace en la figura 19 pero para la muestra D.



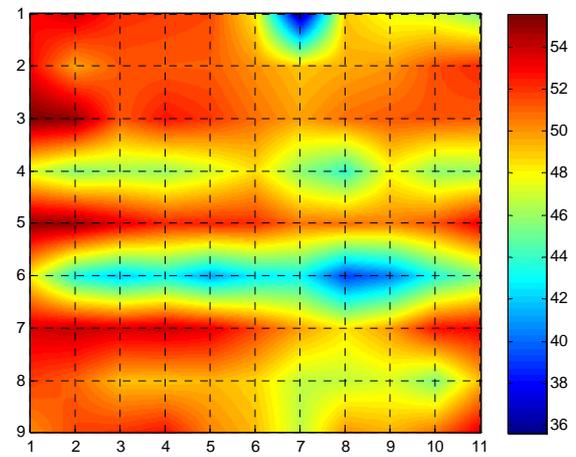
(a) Partición A. Posición 2 de la fuente sonora. Frecuencia: 250 Hz



(b) Partición A. Posición 2 de la fuente sonora. Frecuencia: 2,5 kHz

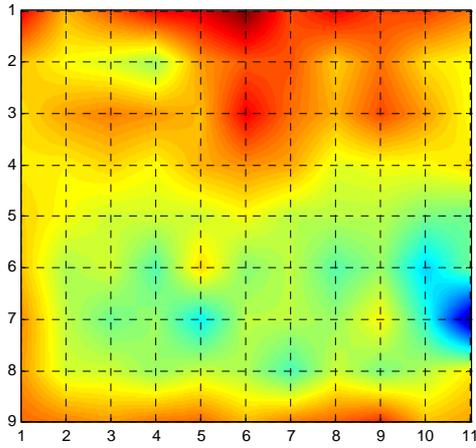


(c) Partición A. Posición 2 de la fuente sonora. Frecuencia: 5 kHz

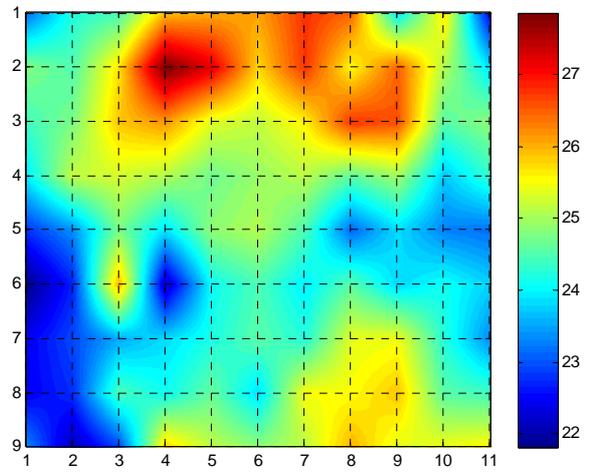


(d) Partición A. Posición 4 de la fuente sonora. Frecuencia: 250 Hz

Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad

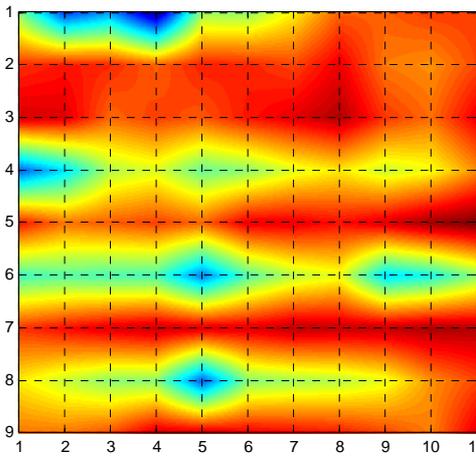


(e) Partición A. Posición 4 de la fuente sonora. Frecuencia: 2,5 kHz

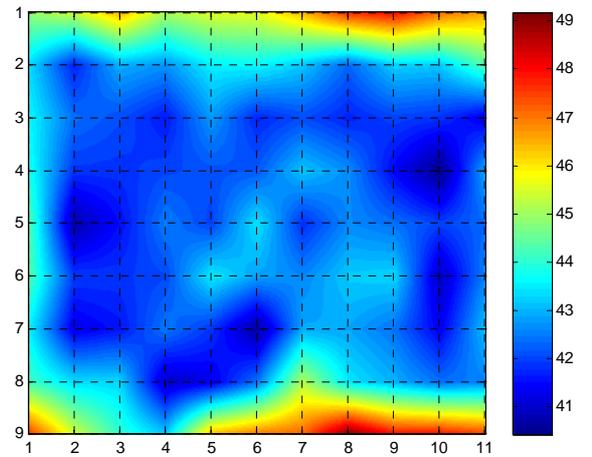


(f) Partición A. Posición 4 de la fuente sonora. Frecuencia: 5 kHz

Figura 18. Mapas de intensidad de la muestra A. Mediciones con un espaciador de 12 mm y una distancia muestra-sonda de 20 cm

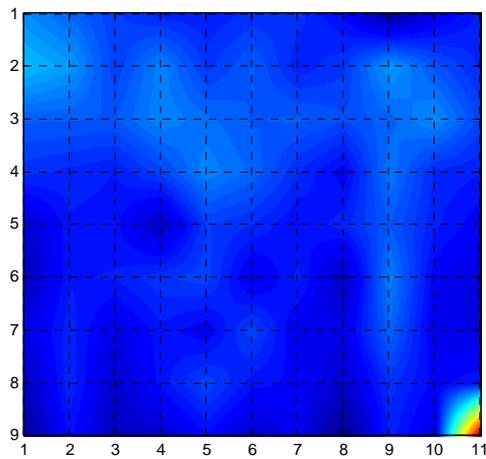


(a) Partición D. Posición 2 de la fuente sonora. Frecuencia: 250 Hz

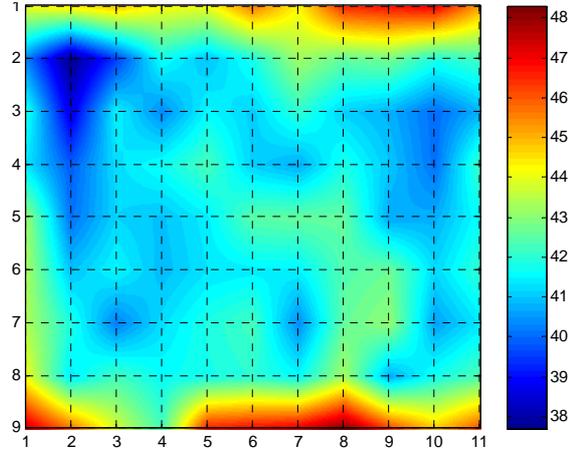


(b) Partición D. Posición 2 de la fuente sonora. Frecuencia: 2,5 kHz

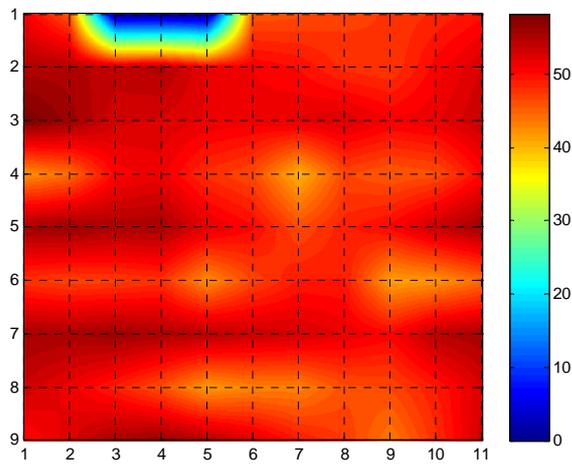
Estimación del aislamiento acústico por la técnica de intensidad



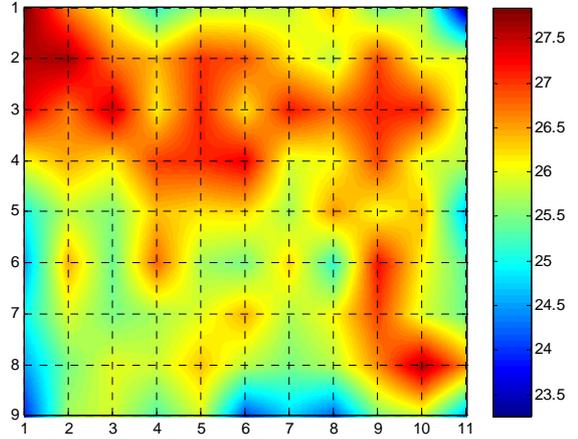
(c) Partición D. Posición 2 de la fuente sonora. Frecuencia: 5 kHz



(e) Partición D. Posición 4 de la fuente sonora. Frecuencia: 2,5 kHz



(d) Partición D. Posición 4 de la fuente sonora. Frecuencia: 250 Hz



(f) Partición D. Posición 4 de la fuente sonora. Frecuencia: 5 kHz

Figura 19. Mapas de intensidad de la muestra D. Mediciones con un espaciador de 12 mm y una distancia muestra-sonda de 23 cm

5. Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

Los efectos del ruido en la salud y nuestras actividades cotidianas son vividos por la mayoría de las personas de México y el mundo. El ruido y sus efectos puede ser estudiado en la literatura base de acústica, como en Kryter [1], o en la literatura general sobre salud y medio ambiente [2] [3]. De manera práctica, y para reducir los efectos negativos del ruido en nuestras vidas, existen criterios recomendables que deben tenerse en ciertos recintos o espacios como: casas, salones de clases, hospitales, laboratorios, oficinas, etc. Este tipo de indicadores también pueden encontrarse en la literatura [4] o en documentos de organismos internacionales como en la Organización Mundial de la Salud, WHO [2]. En general, estos métodos de clasificación procuran reducir la medición de ruido a un único valor que elimina su complejidad temporal-espacial-espectral y parte de su efecto subjetivo. La estimación del aislamiento sonoro de diferentes materiales usados en la construcción es de suma importancia para conseguir los niveles de ruido requeridos en los recintos y otros ambientes arquitectónicos desde su diseño y para cuidar los detalles necesarios al momento de construir estos espacios. En el caso de viviendas, el incremento de la densidad de población ha incrementado la demanda de privacidad y, en consecuencia, el aislamiento sonoro entre viviendas se ha convertido en un tema de suma importancia. La cantidad de energía sonora que viaja a través de dos viviendas con muros comunes no solo es función del muro común (división) sino también de la estructura que la rodea. Desde el punto de vista de energía y en el modelo más sencillo, cuando una fuerza generada por un campo sonoro se aplica a una superficie que separa dos diferentes medios, una fracción de la energía se refleja, otra es

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

absorbida al convertirse en calor, mientras que el resto puede cruzar la superficie y propagarse en el segundo medio. En una estructura real de grosor finito, tendremos al menos una secuencia de tres medios, aire – sólido- aire. En este modelo sencillo, la cantidad de energía disipada en la trayectoria en el sólido es pequeña por lo que no se aplica un modelo de análisis con aproximación termodinámica. La forma clásica de modelar el problema de estimar el asilamiento sonoro de un muro divisorio en un campo debido a sonido de origen aéreo es comparando la energía transmitida al tercer medio en relación al primer medio, esta comparación se hace en función de la frecuencia [5].

La evaluación del aislamiento sonoro en construcciones y elementos de construcción es por medio del índice de reducción sonora, *SRI*. A partir de la estimación del *SRI* es también posible determinar un valor único usando la norma ISO 717-1 [6]. En esta normatividad internacional, las variaciones espaciales-temporales del ruido y el material a evaluar se intentan controlar dentro de los parámetros del laboratorio y de la medición. Para el presente trabajo, *SRI* representa el índice de reducción sonora de sonidos de origen aéreo.

La estimación del *SRI* en laboratorio se logra principalmente por medio de la estimación de la potencia sonora en dos espacios (recintos) reverberantes separados estructuralmente, donde la pared divisoria entre ellos es el material a evaluar. En uno de los cuartos (conocido como cuarto fuente) se coloca una fuente sonora omnidireccional, que genera la potencia sonora W_1 [W] incidente a la pared bajo evaluación. En el otro cuarto (conocido como cuarto receptor) se estima la potencia sonora W_2 [W] transmitida a través del material bajo prueba. Presuponiendo que toda la pérdida de potencia sonora es debida a la pared bajo medición, que la pared bajo prueba está excitada uniformemente en toda su superficie (cuarto fuente) y que no hay energía retransmitida del cuarto receptor al cuarto fuente, la diferencia de la potencia sonora entre

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora
ambos cuartos nos indica el valor de *SRI* conforme a la ecuación (1).

$$RSI = 10 \log_{10} \frac{W_1}{W_2} \text{ dB} \quad (1)$$

Es importante notar que en esta definición el aire es el medio de origen y destino de las ondas sonoras, salvo lo que ocurre en la pared bajo medición. En realidad, existe también la posibilidad de que su origen sea estructural como sería el caso de impactos, o por conversión de sonido a vibración y que como vibración se transmita al material bajo prueba. La estimación de la potencia sonora se puede calcular a partir de las mediciones de presión sonora y más recientemente a partir de intensidad sonora [7]. La estimación del *SRI* debe realizarse en un día de medición, varias veces, y es recomendable repetir al menos una vez la medición en otro día. Esto implica que es necesario medir al menos 2 días [5].

5.1 Método Clásico de estimación del Aislamiento Sonoro

Las mediciones del *SRI* basadas en la presión sonora son consideradas como el método clásico. Estas mediciones deben tomar en cuenta los campos sonoros donde se realizan, debido a la interacción fuente-recinto. Esta interacción fuente-recinto se debe principalmente a que la presión sonora es un escalar función del tiempo-espacio-frecuencia y a que la resistencia interna de la fuente reduce la potencia sonora emitida por la fuente en los campos reverberantes [8] [9]. Por este motivo, los diferentes tipos de campos sonoros están descritos en la literatura relacionada (ver por ejemplo Fahy y Walker [8]). Para una medición acústica efectuada con base a una normatividad internacional, esta descripción de los campos sonoros

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

necesarios para realizar la medición se traduce en requerimientos sumamente específicos para los laboratorios, que se convierten en parte de la instrumentación utilizada. Para el caso de estimación del SRI por el método clásico, estos requerimientos están consignados en ISO 140-1 [10]. A los laboratorios construidos para la estimación del índice de reducción sonora por medio de presión sonora, R , se les conoce en español como Cámara de Transmisión. En México, y hasta donde se tiene conocimiento, las únicas instalaciones de este tipo que cumplen con las especificaciones y han sido caracterizadas conforme a lo solicitado en ISO 140-1 [10] e ISO 140-3 [5] pertenecen al CCADET-UNAM [11] [12]. Países con un mayor número de instalaciones de este tipo publican valores típicos de R para los tipos de materiales y construcciones de uso más frecuente para ellos, ya sea dentro de su literatura [4] o como información disponible para todos [13]. En México no se cuenta con este tipo de información específica y la costumbre para el diseño es usar la información disponible en la literatura relacionada. Desafortunadamente los valores representados en la mayoría de los libros no incluyen materiales de uso generalizado en México. Tampoco se incluyen detalles de montaje, soslayando así el hecho de que el montaje juega un papel importante en la medición de R , como se comprende luego de realizar una medición bajo la norma ISO 140-3 e ISO 15186-1 [12].

Desde un punto de vista teórico, se analizan principalmente paredes sencillas y dobles. El desarrollo de los modelos para muro sencillo, donde la onda sonora puede incidir de manera normal al muro, oblicua o difusa (aleatoria), forma parte del bagaje que se encuentran en la literatura sobre el tema [14]. El modelo de Sharp [15] es el de uso más recomendado y la correlación entre algunos modelos de muros sencillos de un solo material y las mediciones del índice de reducción sonora son bastante buenas [14] [16]. En la mayoría de los modelos de

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

paneles sencillos, queda reflejada la relación directa que tiene la densidad superficial del material con R , que es conocida como la *Ley de masas*. La expresión de la ley de masas a incidencia normal [14] está dada por:

$$R = 20 \log_{10} (m) + 20 \log_{10} (f) - 20 \log_{10} (\rho_0 c / \pi) \text{ dB} \quad (2)$$

Donde:

f = frecuencia [Hz].

m = masa por unidad de área [kg/m^2].

ρ_0 = densidad del aire [kg/m^3].

c = velocidad del sonido en el aire [m/s].

$\rho_0 c$ representa la impedancia acústica del aire para onda plana. Ejemplos de su aplicación práctica (e intuitiva) puede verse en los edificios e iglesias de la época colonial. Para aumentar el valor de R procurando reducir o conservar la cantidad de material usado es que se introduce una capa de aire y/o material absorbente entre dos paneles o muros. Las paredes ligeras de materiales prefabricados están generalmente construidas bajo este concepto de panel doble. Sharp [15] desarrolló un modelo del aislamiento sonoro que presenta este tipo de muros y sus resultados forman parte de los fundamentos del estudio de paneles dobles [14]. Un estudio reciente [17] indica una correlación aceptable (hay diferencias de más de 5 dB en frecuencias medias) entre este modelo y las mediciones de R para algunos muros de paneles de yeso (tabla-roca). Para otro tipo de materiales se indican mayores discrepancias entre el modelo y la medición de R [14] [16]. También es significativo recordar que ya instalados, los materiales en sí, su montaje y ubicación en la estructura pueden afectar notablemente los valores reales de R . Con respecto a una norma internacional de medición, es importante resaltar que el objetivo

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

final es unificar los conocimientos que se tienen de la ciencia e ingeniería con las posibilidades de su medición de tal forma que estas mediciones puedan ser reproducibles, repetibles y aplicables. Esta situación es frecuente en acústica y las diferencias que existen entre el conocimiento y la normatividad pueden encontrarse en amplios estudios consignados en la literatura relacionada. Como por ejemplo, Fahy [18] señala diferencias entre nuestros conocimientos y la estimación del coeficiente de absorción de potencia sonora (α), que se emplea en la estimación del índice de reducción sonora. Además del problema de montaje, que está en directa relación con la persona que realiza el trabajo dentro de la Cámara de Transmisión, la norma ISO 140-3 [5] considera los problemas de variaciones temporales-espaciales-espectrales de los campos sonoros en ambos cuartos (fuente y receptor). Este problema aumenta a bajas frecuencias, pues en esta región se pierde la difusividad de los cuartos [19]. De aquí surge la corrección de Waterhouse en el cuarto receptor, K_C , que técnicamente debiera ser aplicada a las mediciones de R bajo la norma ISO 140-3, pero no es necesaria en el método de intensidad sonora de la norma ISO 15186-1 [20]. Para el cuarto fuente, la norma exige poner la fuente sonora en varias posiciones dentro del cuarto (mínimo 2) y cuantificar la variabilidad espacial del campo sonoro. En ambos cuartos se restringe la posición de los micrófonos, el tiempo de promediar y el intervalo de frecuencia de medición [5]. Otro problema importante es la transmisión de potencia sonora del cuarto fuente al cuarto receptor por medios o trayectorias diferentes a la pared bajo medición. A este fenómeno se le conoce como flanqueo [21]. El anexo A de la norma ISO 140-3 [5] considera este problema. Otro factor básico que puede influir la medición es la superficie total del material bajo prueba y su absorción sonora [22] [23]. La superficie de la muestra (10m^2) está determinada dentro de la norma ISO 140-1 [10]. La absorción sonora del material está vagamente considerada dentro

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

de las especificaciones del tiempo de reverberación de los cuartos. El ruido de fondo debe medirse para corregir su efecto [5]. Las condiciones ambientales (presión, temperatura y humedad) también influyen y deben ser consignadas. La norma requiere que el procedimiento de medición tenga una repetibilidad satisfactoria, cuyos valores numéricos se encuentran en [24]. No considerado en la norma ISO 140-3 pero de estudio en la literatura (en ISO 15186-1 [20] se considera al momento de definir la superficie de medición), está el problema conocido como *tuneleo* o *efecto de nicho* por la zona de tipo túnel que generalmente se forma, en el cuarto fuente, al colocar la muestra a medir [25]. Cuando la muestra a medir tiene un espesor menor que este espacio, se genera este efecto que influye a bajas frecuencias. La determinación de R se hace a través de la fórmula que está derivada en [12] y que aparece en ISO 140-3 [5], la cual a partir de la ecuación (1) queda como:

$$R = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A_r} \right) \quad (3)$$

Donde:

L_1 = Nivel de presión sonora promedio en el cuarto fuente [dB re 20 μ Pa].

L_2 = Nivel de presión sonora promedio en el cuarto receptor [dB re 20 μ Pa].

S = Área del espécimen bajo prueba [m^2].

Con base a la norma ISO 354 [26], el área de absorción sonora equivalente se obtiene de:

$$A_r = 0,163 \cdot \frac{V_r}{T_{60}} \quad (4)$$

Donde V_r y T_{60} son el volumen [en m^3] y el tiempo de reverberación del cuarto receptor [en s], respectivamente.

5.2 Determinación del Aislamiento Sonoro usando intensidad sonora

Los conceptos, desarrollo de la medición, instrumentación, errores asociados y uso de intensidad sonora están claramente expuestos en Fahy [27]. La mayor diferencia entre la medición de intensidad sonora y su aplicación en la estimación del aislamiento sonoro en laboratorio se encuentra en las características del campo sonoro. La técnica de Intensidad sonora requiere recintos poco reverberantes para su mejor aplicación (entre más anecoico mejor); por contraste, para medir aislamiento sonoro usualmente se emplean cuartos reverberantes (debido a la medición basada en presión sonora). La posibilidad de usar el equipo estándar de medición de intensidad sonora para la estimación del aislamiento sonoro fue verificada por B. G. van Zyl [28]. El anexo A de la norma ISO 9614-1 [7] describe la manera de calcular cuatro indicadores de campo (F_1 , F_2 , F_3 y F_4), mientras que su anexo B indica el procedimiento de como usarlos para obtener el grado de exactitud deseado. El presente trabajo se fundamentó en la norma ISO 15186-1 [20] donde se indica usar un método grado 2 (de ingeniería) para la medición de potencia sonora, conforme a [7]. La fuente sonora, el ruido generado y las posiciones de la fuente sonora deben cumplir con ISO 140-3 [5]. De igual forma, la medición en el cuarto fuente debe ser conforme a [5]. Se debe estimar el indicador de presión superficial-Intensidad F_{pl} (llamado F_2 en ISO 9614-1 [7]) de las mediciones realizadas en el cuarto receptor, dado por:

$$F_{pl} = L_p - L_{In} \text{ dB} \quad (5)$$

Donde:

L_{In} = Nivel de intensidad sonora (integrado espacial y temporalmente) [dB re 10^{12} W/m²].

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

L_p = Nivel de presión sonora superficial (integrado espacial y temporalmente) [dB re 20 μ Pa].

Si la intensidad medida es negativa o si $F_{pl} > 10$ dB para una muestra con superficie reflejante de sonido o $F_{pl} > 6$ dB para una muestra con superficie absorbente en el cuarto receptor; primeramente se debe tratar de aumentar la distancia de medición (muestra-sonda) de 5 a 10 cm. Si esto falla, poner más material absorbente en el cuarto receptor [20].

Desde su aparición como técnica de medición basada en la Transformada Rápida de Fourier (FFT), intensidad sonora se ha empleado para estimar el índice de reducción sonora, como por ejemplo van Zyl [29]. Al poco tiempo, las diferencias entre las estimaciones de R hechas en base al método convencional normalizado (presión sonora) y las mediciones de intensidad sonora, empezaron a surgir en la literatura, como por ejemplo Halliwell [30]. La mayoría de estos trabajos fue para muestras pequeñas. Un ejemplo de estas diferencias se puede encontrar en el anexo A de ISO 15186-1 [20], donde se ejemplifica una sobreestimación del índice modificado de reducción sonora por intensidad $R_{I,M}$ con respecto a R que es medido en ISO 140-3 [5]. $R_{I,M}$ está definido como:

$$R_{I,M} = R_I + K_C \text{ dB} \quad (6)$$

Donde:

R_I = Índice de reducción sonora por intensidad [dB].

K_C = Término de adaptación, conocido como la corrección de Waterhouse [dB].

Cabe recalcar nuevamente que en realidad esta corrección de Waterhouse, K_C , debiera ser aplicada a R . la medición de R_I no requiere de esta corrección. Esta corrección se usa para comparar valores medidos bajo las dos normatividades [20].

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

La derivación de R_I se puede encontrar en [12]. La ecuación final en ISO 15186-1 [20] es:

$$R_I = 10 \log_{10} \left(\frac{W_1}{W_{2I}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{p_1^2 S}{4 \rho c I_{n2} S_m} \right) = L_1 - 6 - \left[L_{In} + 10 \log_{10} \left(\frac{S_m}{S} \right) \right] \text{ dB} \quad (7)$$

Donde:

L_{P1} = Nivel de presión sonora promedio en el cuarto fuente [dB re 20 μ Pa].

L_{In} = Nivel de intensidad sonora promedio sobre la superficie de medición en el cuarto receptor [dB re 10^{-12} W/m²].

S_m = Área total de la superficie de medición [m²].

S = Área del espécimen bajo prueba [m²].

La corrección de Waterhouse, K_C , está definida como:

$$K_C = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{S_{br} \lambda}{8V_r} \right) \text{ dB} \quad (8)$$

Donde:

S_{b2} = Área de todas las superficies colindantes en el cuarto receptor [m²].

V_2 = Volumen del cuarto receptor [m³].

λ = Longitud de onda de la frecuencia media [m].

La mayoría de las diferencias reportadas en la literatura son con base a las estimaciones realizadas para muestras pequeñas, con las ecuaciones (3) y (6) o (3) y (7) en un mismo recinto y el mismo material, como se ejemplifica en el anexo A de ISO 15186-1 [20]. Este anexo tiene su origen en el estudio publicado por Jonasson [31]. En dicho estudio, se menciona que el *round-robin* fue para dos ventanas de acero de una y dos capas de metal.

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

Es importante resaltar que la corrección de Waterhouse, ecuación (8), se desarrolló para recintos tipo ortoedro, conocidos en la literatura del tema como recintos rectangulares. Waterhouse [19] indica que un problema en este tipo de recintos es la distribución no uniforme de la energía en el cuarto fuente y que esta distribución excita de manera no uniforme la muestra a medir (mayor energía en los bordes y menor al centro de la muestra). Es de mayor importancia a bajas frecuencias, donde la densidad modal tiene su valor mínimo. Estas afirmaciones han sido justificadas en [32], también para muestras cuadradas pequeñas (1.30 m^2 y 2.31 m^2).

Para mediciones de R_l equiparables con R , el tiempo de reverberación no tiene gran influencia en la medición, siempre que el indicador de campo F2 se cumpla [33]. Recientemente, Hongisto [34] propuso que la mayor diferencia entre el método de presión y el método de intensidad es que el máximo índice de reducción sonora usando Intensidad $R_{I,\max}$ es mucho mayor que el máximo índice de reducción sonora usando presión R_{\max} . Para maximizar R_l se aumenta la absorción en el cuarto receptor (disminuyendo el tiempo de reverberación) y acercándolo más a las condiciones ideales para la medición de intensidad sonora. Diversos autores coinciden en que la estimación del SRI basado en mediciones de intensidad sonora es recomendable cuando existen problemas de flanqueo [12] [13] [16] [22] [23]. Por lo que es importante dar preferencia a las mediciones basadas en intensidad sonora en estos casos, como lo indica la propia norma [20].

5.3 Mediciones en la Cámara de Transmisión del CCADET-UNAM.

La Cámara de Transmisión del CCADET-UNAM tiene una forma irregular que permite aumentar su difusividad [35]. Las paredes de los cuartos reverberantes de la Cámara de Transmisión tienen un espesor de 30 cm de concreto, con lo que se satisface los requerimientos de la enmienda 1 [36] de la norma ISO 140-1 para aperturas de prueba de paneles ligeros dobles. Debido a su forma irregular, no es directa la aplicación de la teoría de recintos (desarrollada para recintos rectangulares), como sería el caso de la corrección de Waterhouse y el de densidad modal. Para fines de la medición, se realizó el cálculo de la corrección de Waterhouse considerando su volumen y área como si fuera un recinto rectangular. K_C es función de la velocidad del sonido, por lo que sus valores varían ligeramente de una medición a otra en función de las condiciones ambientales. Los valores promedio de K_C están en la Tabla 1:

Tabla 1: Valores promedio de la corrección de Waterhouse, K_C , para la Cámara de Transmisión del CCADET-UNAM

Frecuencia	Kc	Frecuencia	Kc
Hz	dB	Hz	dB
100.00	2.097	794.33	0.327
125.89	1.741	1000.00	0.262
158.49	1.436	1258.90	0.209
199.53	1.177	1584.90	0.167
251.19	0.959	1995.30	0.133
316.23	0.779	2511.90	0.106
398.11	0.629	3162.30	0.084
501.19	0.507	3981.10	0.067
630.96	0.407	5011.90	0.053

Las condiciones ambientales de medición para las 4 muestras son:

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

Temperatura:	22,15 °C	± 2,0 °C
Humedad relativa:	53.2 %	± 10,0 %
Presión atmosférica:	77,6 kPa	± 0,2 kPa

La Cámara de Transmisión se diseñó de tal forma que su apertura para montaje de la muestra tuviera 351 cm x 284 cm, con lo que se satisface el requerimiento de 10 m² [10]. Para las mediciones de los cuatro materiales, y debido a que el espesor de los muros de prueba se mantiene constante, los volúmenes de los recintos fuente y receptor son de 79,27 m³ y 71,05 m³ respectivamente. Una descripción detallada de la Cámara de Transmisión del CCADET-UNAM se encuentra en [11], su utilización para la medición de R en [37]. La figura 1 muestra su vista superior.

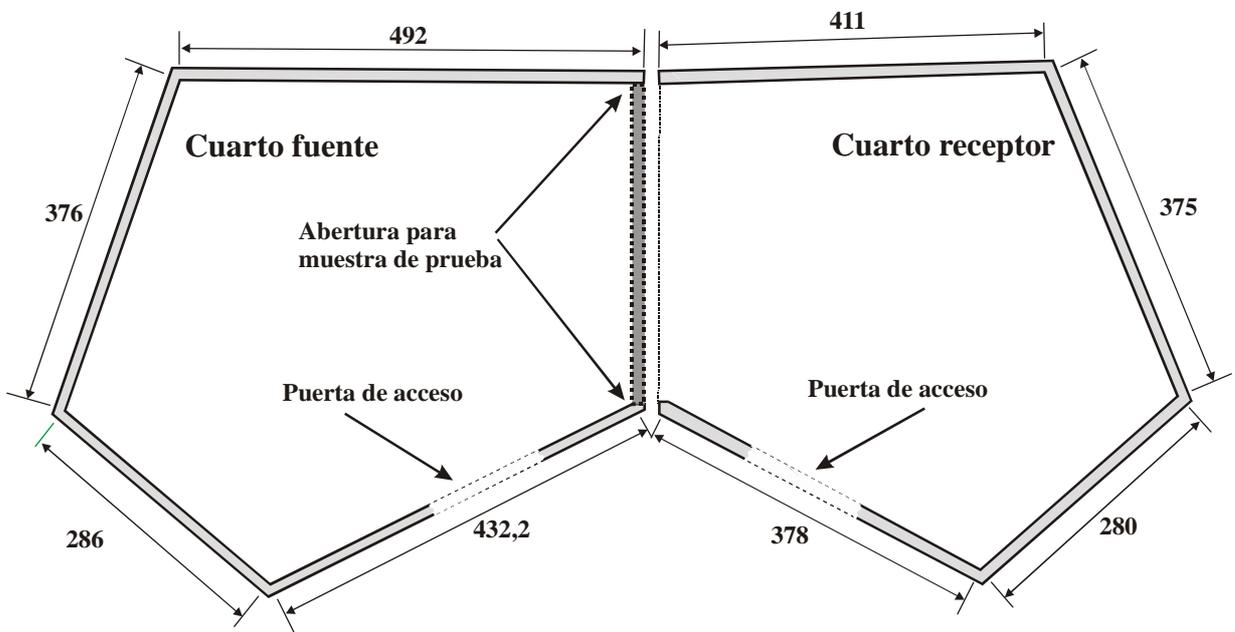


Figura 1. Vista superior de la Cámara de Transmisión del CCADET-UNAM.

Acotaciones en cm.

Se probaron cuatro materiales prefabricados: tres del tipo tabla-cemento y un tabla-roca. Se clasificaron como: Muestra A tabla-cemento de 13 mm de espesor. Muestra B tabla-cemento de 11 mm de espesor, Muestra C tabla-roca de 13 mm de espesor y Muestra D tabla-cemento de 13 mm de espesor. Los espesores, características y marcas son de uso común en México. Se buscó un proveedor de estos materiales que tuviera sucursales en las ciudades de México y Querétaro. Para evitar que el montaje fuera un factor dentro de las mediciones desarrolladas en la Cámara de Transmisión del CCADET-UNAM, se recurrió a un contratista con más de cinco años de experiencia en el montaje de paneles prefabricados. Los paneles dobles de los cuatro materiales fueron montados usando la misma estructura de soporte. Esto permitió que el grosor de la pared fuera semejante. Existe una diferencia total de aproximadamente 0,6 cm entre la pared más delgada y la pared más gruesa (lo que implica una diferencia en los volúmenes del cuarto fuente de $0,06 \text{ m}^3$). El montaje lo realizó el contratista conforme a sus usos y costumbres, respetando las indicaciones de los fabricantes de los materiales. En ninguno de los cuatro materiales se usó un relleno de material absorbente entre las divisiones (es decir, sólo hay una capa de aire y la herrería de soporte entre los paneles). Todos los paneles medidos cubrían la superficie solicitada de 10 m^2 (muestras grandes). Luego de montado cada material, se esperó dos días a que se secase el montaje conforme a lo indicado por los fabricantes y el contratista. Posteriormente se procedió a realizar la serie de mediciones. Primeramente se hicieron las mediciones basadas en presión sonora, que fueron realizadas por personal del CCADET-UNAM. Se continuó con las mediciones por intensidad sonora realizadas por personal del CENAM. Esto permitió evitar conocimiento previo que correlacionara ambas mediciones. El equipo usado en la medición de intensidad sonora es del

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

tipo clase 1 conforme a la norma internacional IEC 61043 [38]. Los micrófonos y equipos usados en esta medición cuentan con Certificados de Calibración recientes emitidos por el CENAM. Terminadas las mediciones de una muestra se desmontó el material y se procedió a repetir el procedimiento para otra muestra. Usando la medición basada en presión sonora, de acuerdo a la norma ISO 140-3, y conforme a la ecuación (3) y (4) se determinó R para los cuatro materiales [37]. Siguiendo la literatura del tema, la estimación de R se considera como la referencia para su comparación con la técnica de intensidad sonora. Las mediciones de R_I fueron realizadas conforme se indica en la normatividad para intensidad sonora: ISO 15186-1 e ISO 9614-1. La repetibilidad de estas mediciones está dentro de lo indicado en ISO 140-2 [12].

Las principales variables para determinar R_I deben ser investigadas de manera experimental. Primeramente se determinaron cuatro posiciones de la fuente sonora omnidireccional [39] en el cuarto fuente conforme a lo indicado por ISO 140-3. Su efecto en la estimación de R_I fue estudiado. En las figuras 2 y 3 se presentan las gráficas de los valores medidos para las muestras C y D:

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

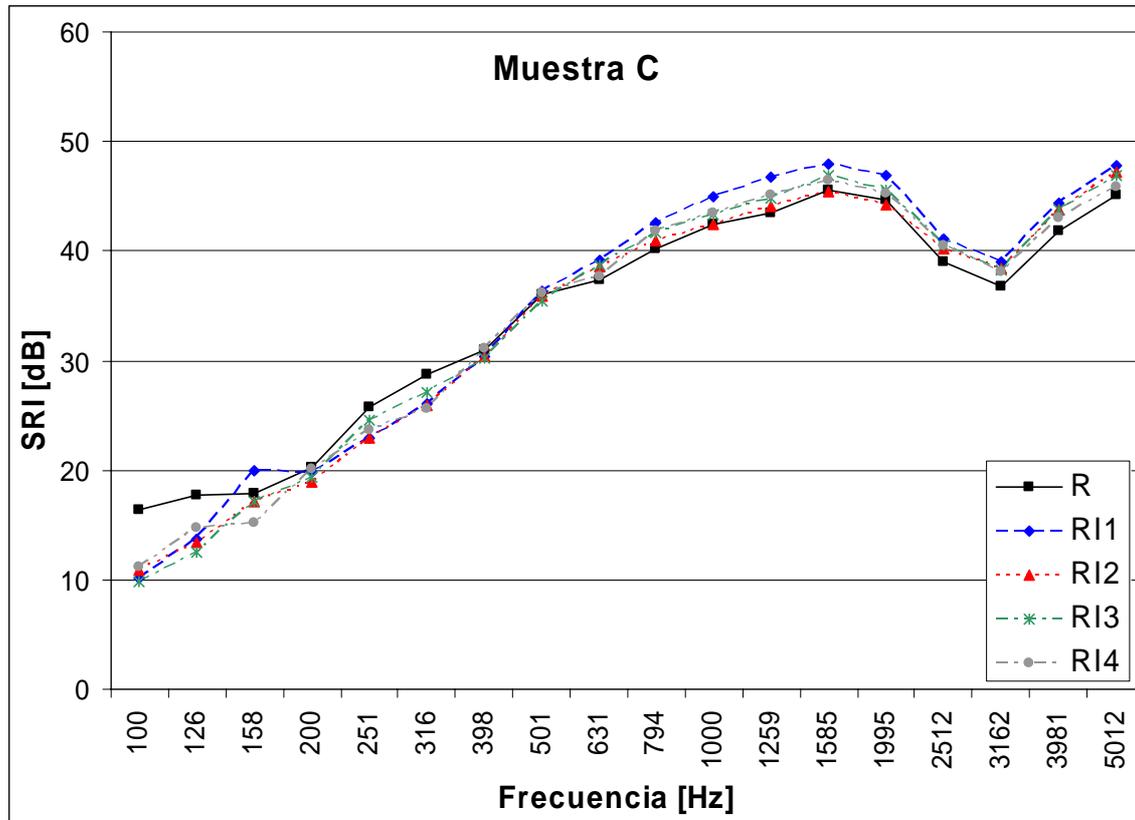


Figura 2 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra C (tabla-roca de 13 mm de espesor) con cuatro diferentes posiciones de la fuente sonora.

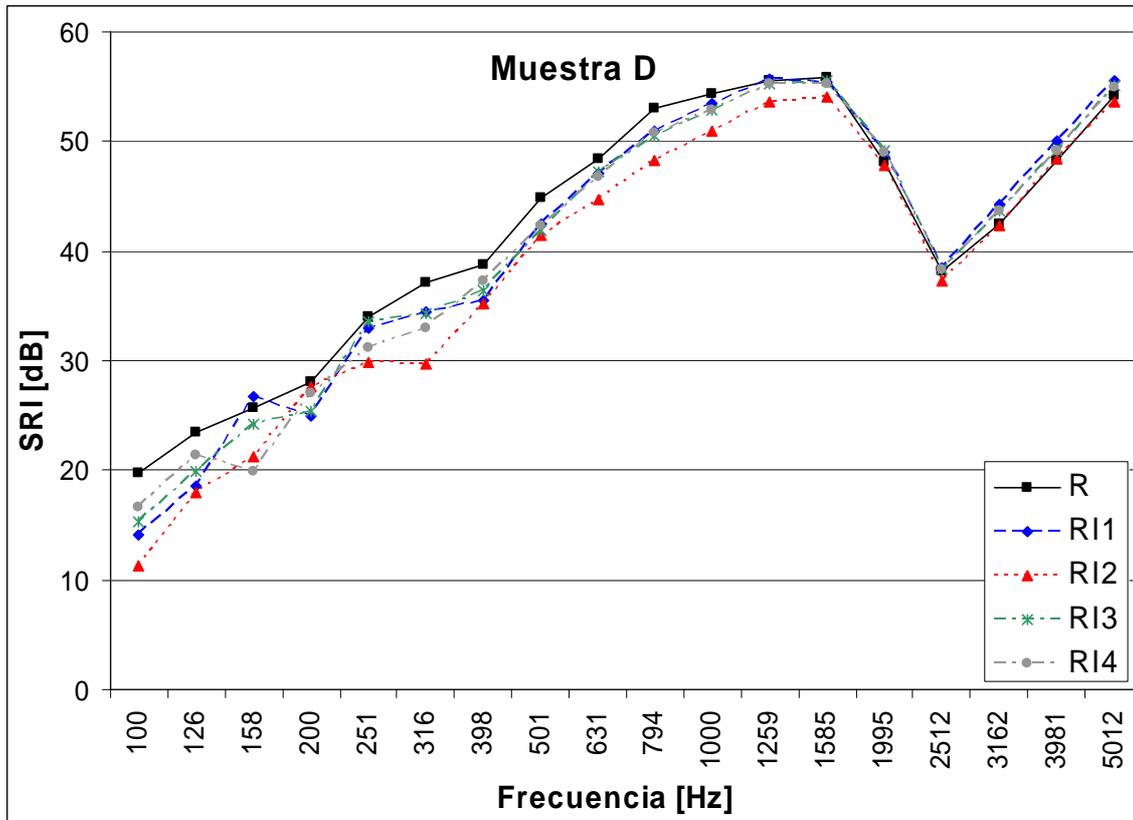


Figura 3 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra D (tabla-cemento de 10 mm de espesor) con cuatro diferentes posiciones de la fuente sonora.

De las figuras 2 y 3, R indica la medición basada en presión sonora y RI_i indica la medición basada en intensidad sonora con la fuente sonora en la posición i en el cuarto fuente. Las diferencias observadas en el intervalo de frecuencias de 630 Hz a 2000 Hz pueden deberse a que la pared bajo estudio es excitada de manera no uniforme por detalles del montaje y a la absorción sonora del material bajo prueba. A bajas frecuencias, las diferencias son debidas principalmente a la baja difusividad en el cuarto fuente. En términos generales, se requiere un mínimo de tres posiciones para cumplir con lo solicitado en ISO 140-3; por lo que de ser

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

necesario, podría eliminarse la posición 2 de la fuente sonora. Esto es debido a que esta posición es la que presenta mayor variabilidad en la medición con respecto a las otras posiciones de la fuente. Sin embargo se decidió conservar las cuatro posiciones de la fuente sonora en las mediciones. Esto permite evaluar mejor las variaciones espaciales de la presión sonora en el cuarto fuente y reducir su influencia en la medición.

Se estudió la influencia de la densidad del arreglo de posiciones de medición en la pared bajo prueba. El primer arreglo de posiciones de medición se hizo con una separación uniforme de 30 cm (99 puntos de medición), mientras que el segundo arreglo de posiciones de medición fue con una separación uniforme de 15 cm (437 puntos de medición). Para ambas superficies de medición de la muestra bajo prueba se cumplió con el criterio del anexo B de ISO 9614-1. Las figuras 4 y 5 presentan las mediciones obtenidas con los dos diferentes arreglos de posiciones de medición para las muestras C y D.

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

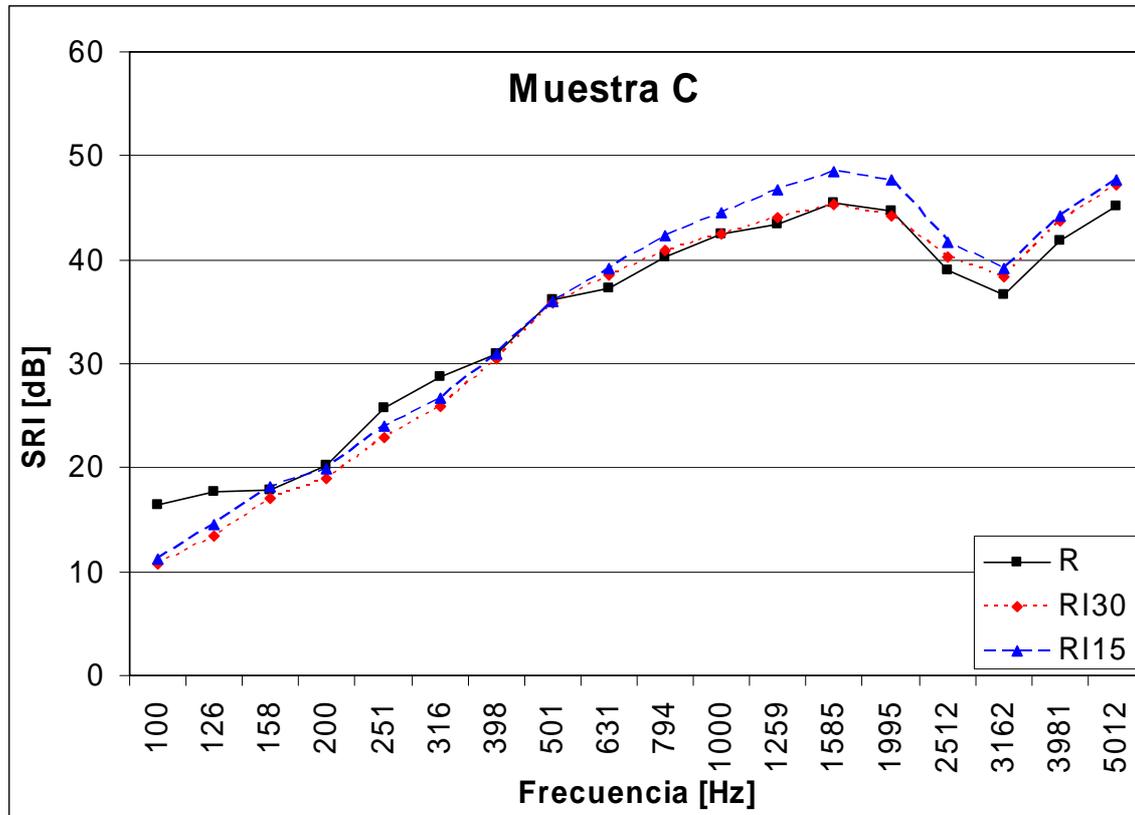


Figura 4 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra C (tabla-roca de 13 mm de espesor) con dos diferentes arreglos uniformes de posiciones de medición.

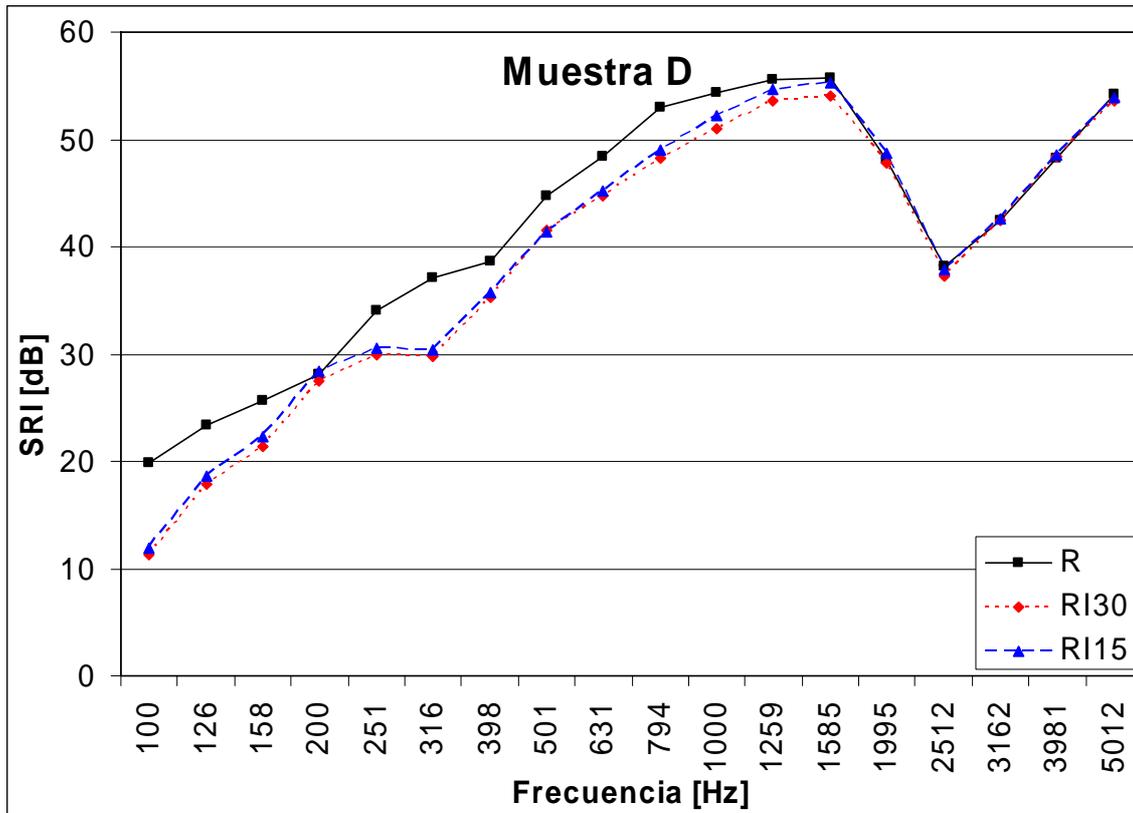


Figura 5 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra D (tabla-cemento de 10 mm de espesor) con dos diferentes arreglos uniformes de posiciones de medición.

De las figuras 4 y 5, R indica la medición basada en presión sonora y RI_{ii} indica la medición basada en intensidad sonora con un arreglo de posiciones de medición uniforme de ii cm de separación. Una mayor densidad de puntos de medición debe presuponer una mejor estimación del aislamiento sonoro, pero esto implica un aumento en el tiempo de medición. En este trabajo, la reducción a la mitad de la distancia de separación entre los puntos de medición implica aumentar por más de cuatro veces el tiempo de medición de la muestra. Como puede observarse de las figuras 4 y 5, este aumento en tiempo de medición no es indicativo de que se van a obtener diferencias significativas entre ambas estimaciones de R_T . Si consideramos que

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

esto debe realizarse para cada posición de la fuente sonora y espaciador entre micrófonos, la mayor densidad de puntos de medición se vuelve necesaria sólo para casos especiales. Estos casos especiales son aquellos donde los problemas de montaje y fugas sean detectados con una superficie de medición de menor densidad de puntos. Para poder mantener la medición de cada muestra en un solo día y debido a que no encontramos variaciones importantes entre ambas estimaciones de R_T , se decidió mantener la separación uniforme de 30 cm para realizar la estimación de R_T .

La distancia entre la muestra bajo prueba y la sonda de intensidad sonora es otra variable que debe ser determinada experimentalmente por ser función de la absorción sonora de la pared bajo medición. La norma ISO 15186-1 sugiere que la distancia muestra-sonda debe estar entre los 10 cm y los 30 cm. En el presente trabajo tres distancias fueron estudiadas: 15 cm, 23 cm y 30 cm. Los resultados son presentados en las gráficas 6 y 7.

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

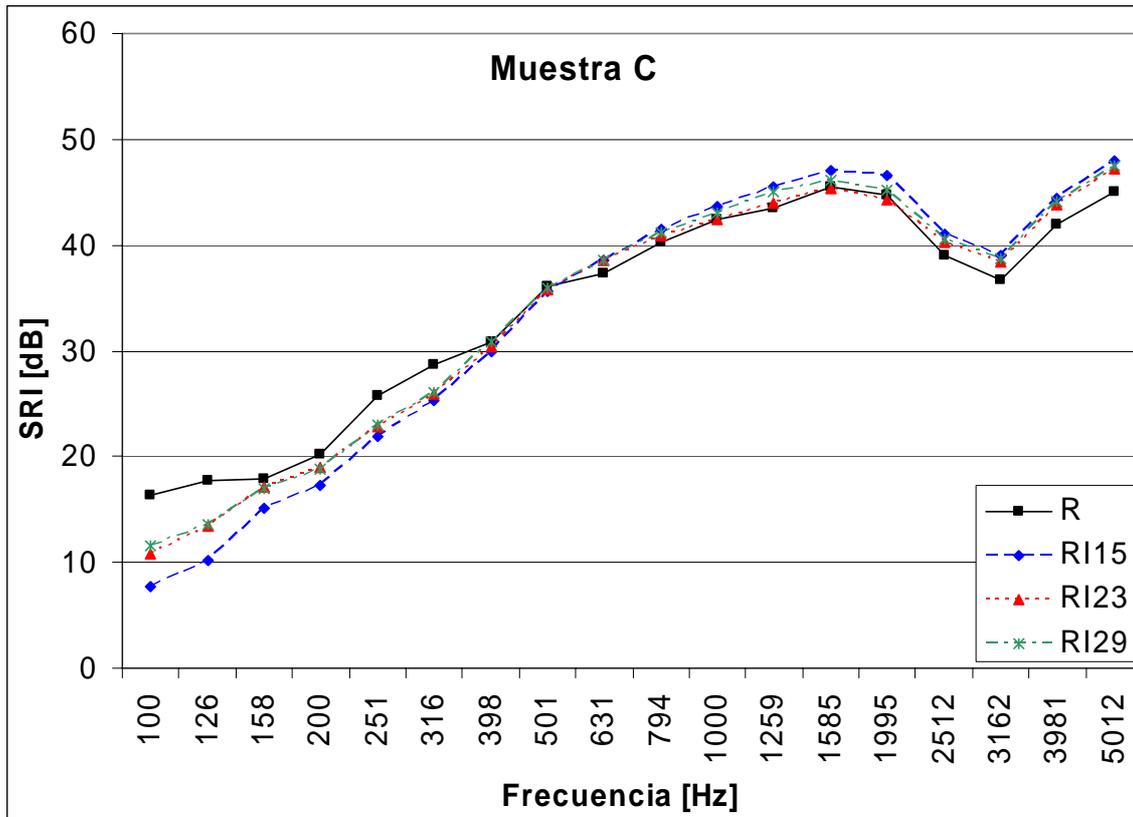


Figura 6 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra C (tabla-roca de 13 mm de espesor) con tres diferentes distancias muestra-sonda.

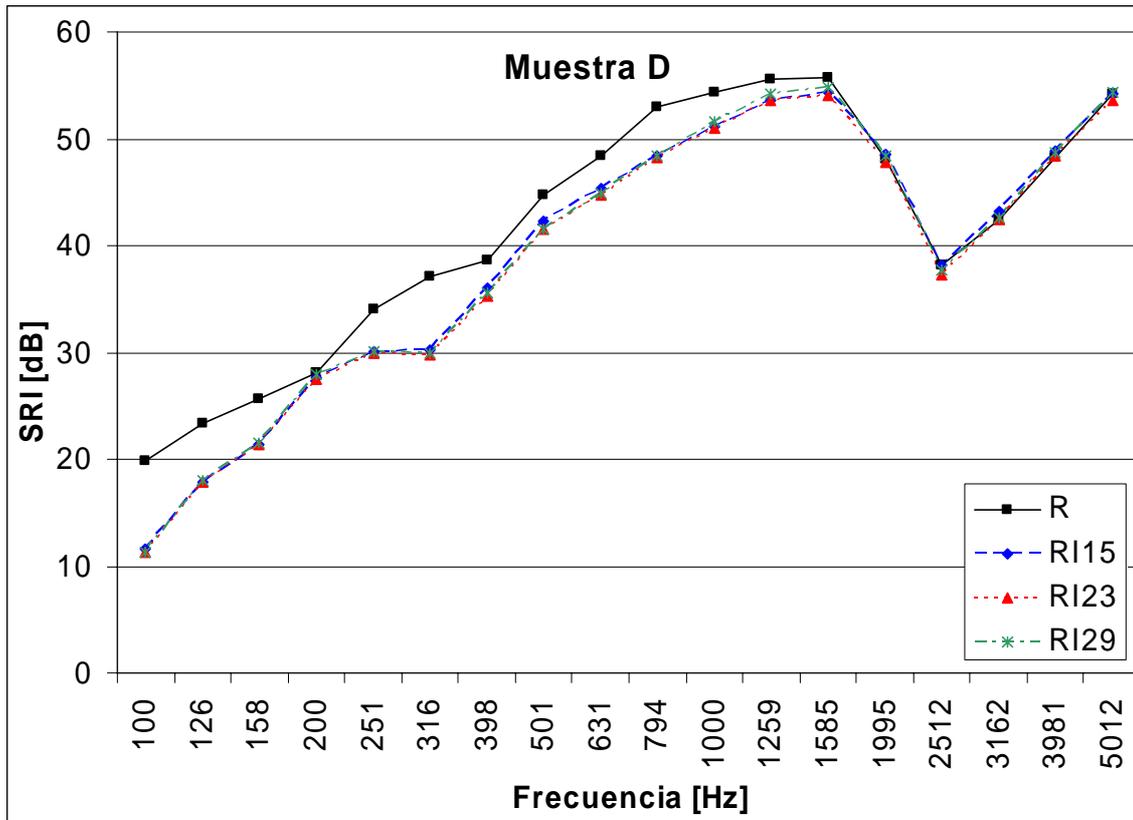


Figura 7 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra D (tabla-cemento de 10 mm de espesor) con tres diferentes distancias muestra-sonda.

De las figuras 6 y 7, R indica la medición basada en presión sonora, RI_{ii} indica una distancia de ii cm entre la pared bajo medición y la sonda de intensidad sonora. Como puede observarse en estas figuras, una distancia reducida entre la muestra bajo prueba y la sonda de intensidad sonora puede ocasionar las mayores diferencias. Esto puede ser debido a que la sonda de intensidad sonora se encuentra aún dentro del campo cercano geométrico de la pared, que en este caso se considera como la fuente sonora. De las mediciones se observó que una distancia superior a los 20 cm era suficiente para lograr resultados con respecto de R . En este caso, se

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora
decidió dejar fija la distancia de 23 cm entre la pared muestra y la sonda de intensidad sonora.

Finalmente fueron investigados los efectos que tienen los espaciadores (separadores sólidos) entre micrófonos de la sonda de intensidad en la medición de R_1 . Existen límites en frecuencia recomendados conforme a un análisis de onda plana para la distancia entre micrófonos [27] [40]. Se estudiaron 3 diferentes espaciadores entre micrófonos: de 50 mm, 12 mm y 6 mm. Los resultados son presentados en las figuras 8 y 9.

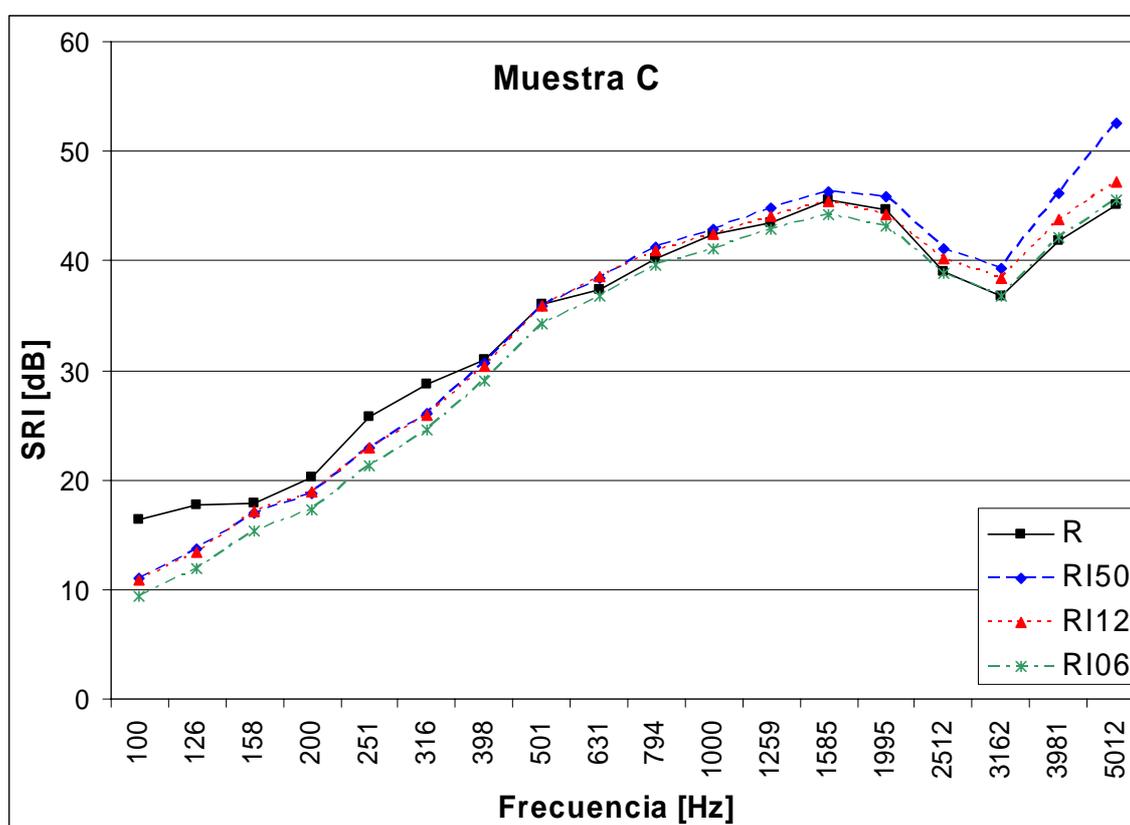


Figura 8 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra C (tabla-roca de 13 mm de espesor) con tres diferentes espaciadores entre micrófonos.

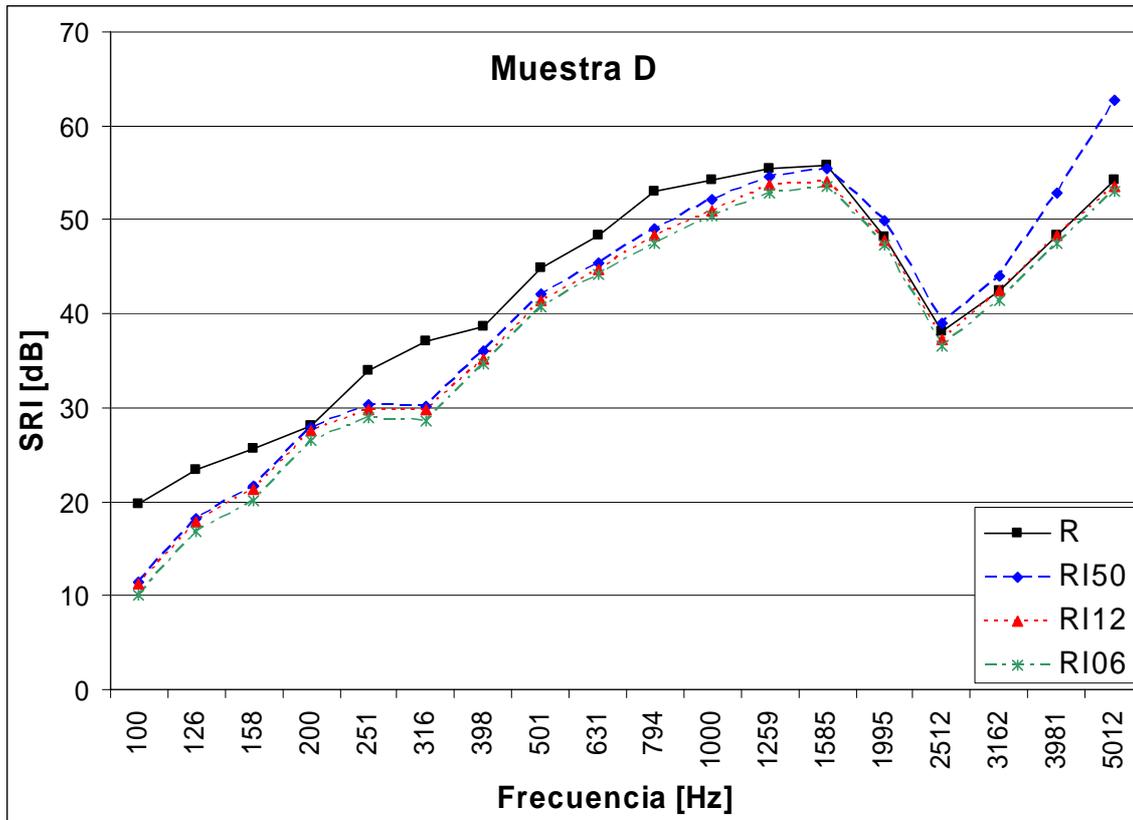


Figura 9 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra D (tabla-cemento de 10 mm de espesor) con tres diferentes espaciadores entre micrófonos.

De las figuras 8 y 9, R indica la medición basada en presión sonora, RI_{ii} indica un espaciador de ii mm entre los micrófonos de la sonda de intensidad sonora. Para estos separadores sabemos que las frecuencias máximas recomendadas son [27] [40]: $f < 860$ Hz para el separador de 50 mm, $f < 3583$ Hz para el separador de 12 mm y $f < 7166$ Hz para el separador de 6 mm. De las mediciones podemos observar que el espaciador de 50 mm puede ser usado hasta 500 Hz o 630 Hz, el de 12 mm hasta 2000 Hz o 2500 Hz y el de 6 mm hasta los 5 kHz. Como cada espaciador implica una medición con las cuatro posiciones de la fuente sonora, para cada distancia muestra-sonda y cada densidad de puntos de medición, es recomendable

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora
reducir el número de espaciadores usados. En caso que se desee hacer una medición preliminar el espaciador de 12 mm es el recomendable.

Resumiendo los resultados de las mediciones en la cámara de transmisión del CCADET-UNAM, para paneles dobles prefabricados se puede usar una distancia muestra-sonda de 23 cm. Tres o cuatro posiciones de la fuente sonora en el cuarto fuente (es posible eliminar la posición 2). Esta decisión debe ser tomada antes de empezar las mediciones y debiera considerar la absorción del material bajo prueba. Una densidad de puntos de medición uniforme de 30 cm (99 puntos) y los espaciadores de 50 mm (250 Hz a 500 Hz) y 12 mm (630 Hz a 5000 Hz). En caso de que se use el espaciador de 6 mm, este se puede aplicar en el intervalo de 2500 Hz a 5000 Hz. Usando estos criterios de: 4 posiciones de la fuente sonora, una distancia muestra-sonda de intensidad de 23 cm y 99 puntos de medición (muestro uniforme de la superficie de medición de 30 cm), se llevó a cabo al estimación de R_I para las cuatro muestras. Estas se presentan en las figuras 10, 11, 12 y 13 con (RIW) y sin corrección de Waterhouse (RI), para su comparación con la medición basada en presión sonora (R).

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

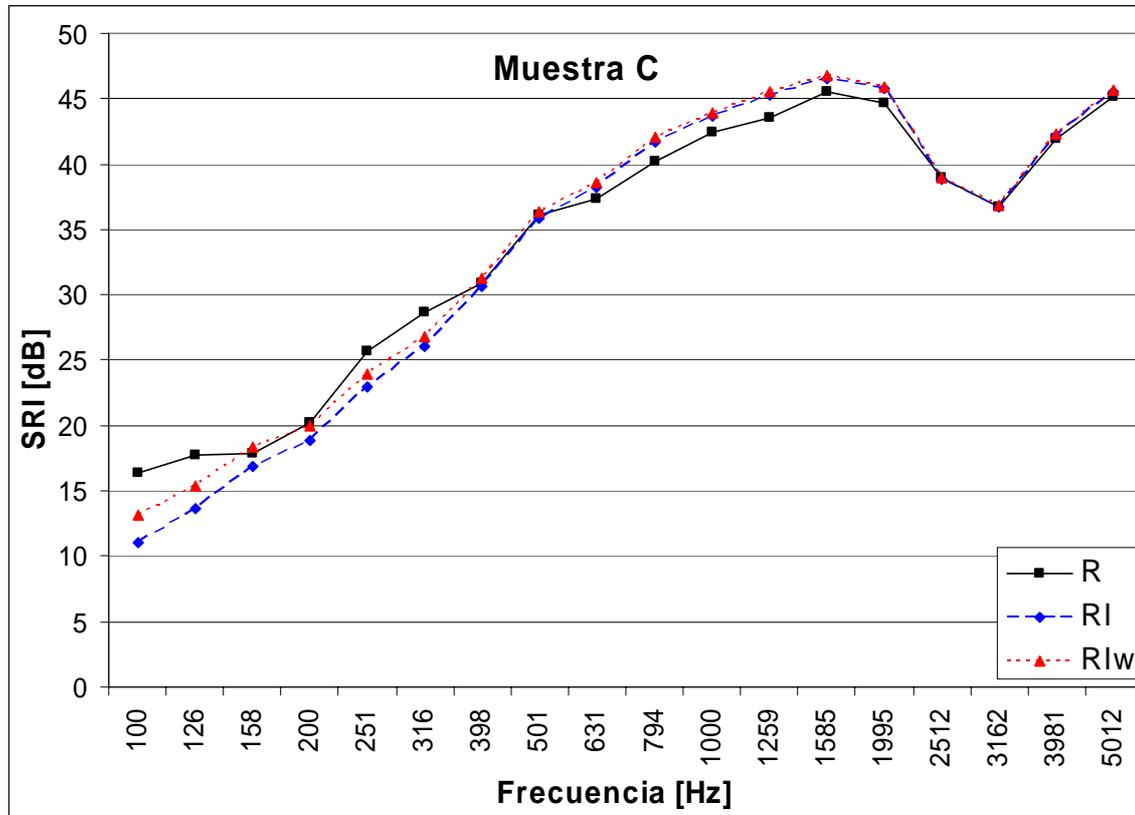


Figura 10 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra C (tabla-roca de 13 mm de espesor) con y sin corrección K_C .

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

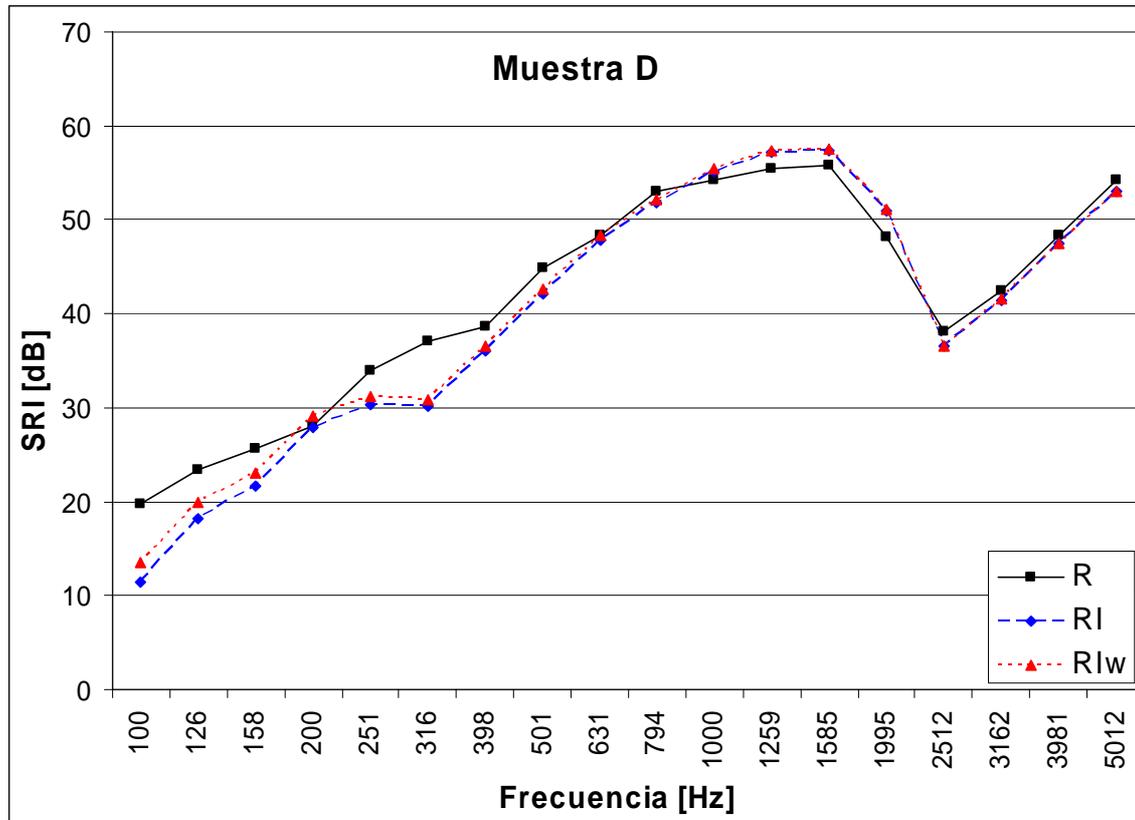


Figura 11 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra D (Tabla-cemento de 10 mm de espesor) con y sin corrección K_C .

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

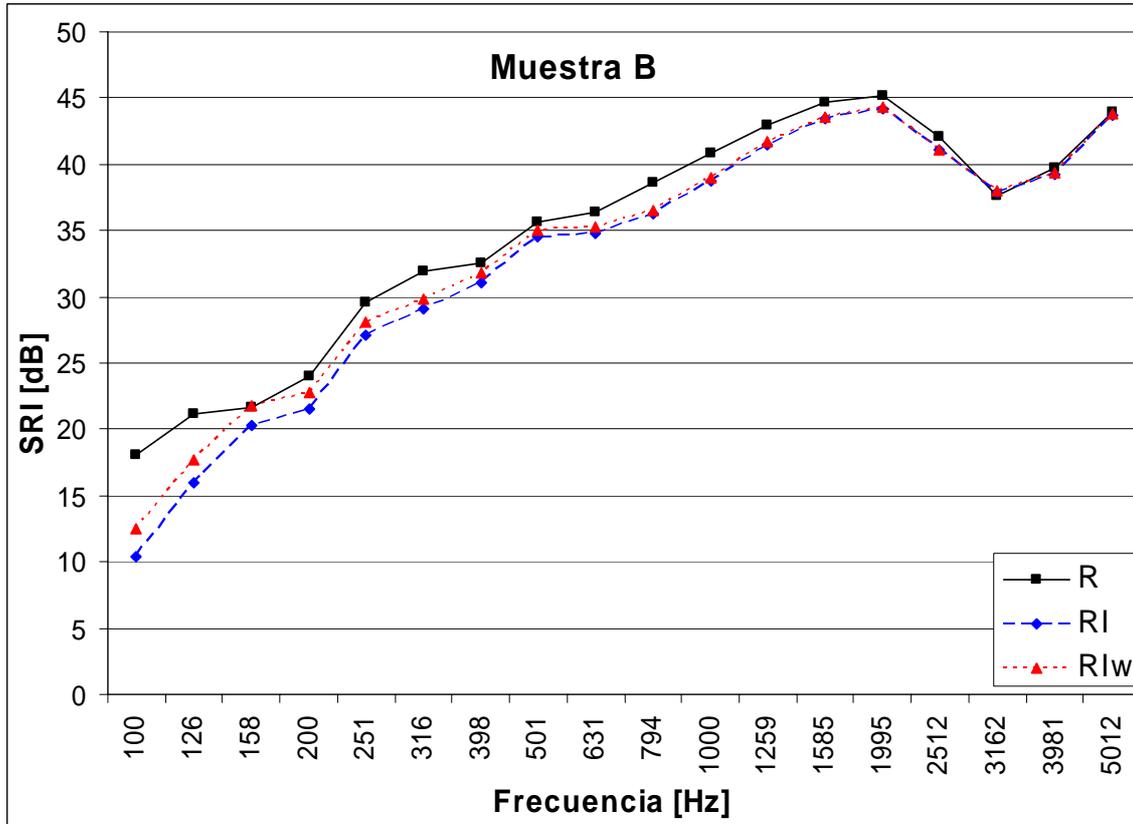


Figura 12 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra B (Tabla-cemento de 11 mm de espesor) con y sin corrección K_C .

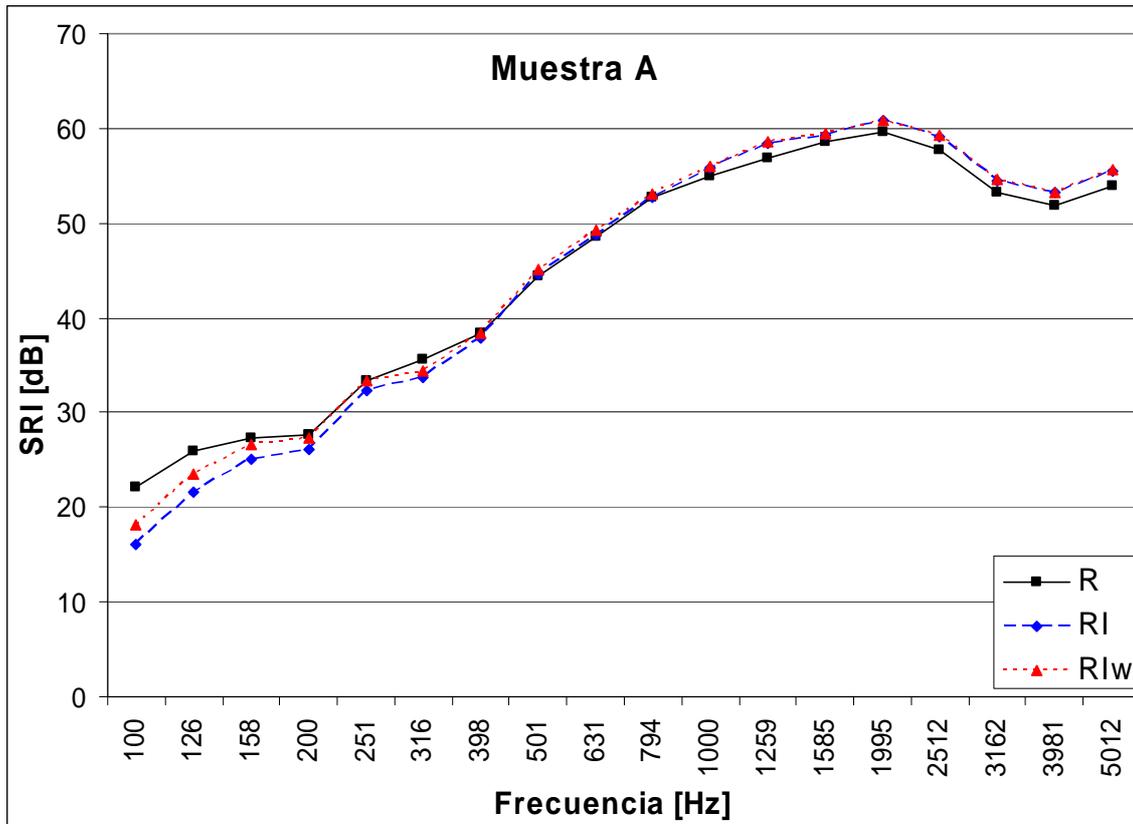


Figura 13 Índice de Reducción Sonora medido para la muestra A (Tabla-cemento de 13 mm de espesor) con y sin corrección K_C .

Todas las mediciones fueron realizadas desde los 100 Hz hasta los 5000 Hz. La frecuencia de corte medida fue de 250 Hz [12]. Esto puede notarse en la variabilidad de los resultados en el intervalo de frecuencias de 100 Hz a 200 Hz. Por este motivo, para este trabajo se consideran válidas las mediciones a partir de 250 Hz. Como puede observarse de las figuras 10, 11, 12 y 13, la Muestra D es la de peor correlación entre la medición basada en presión sonora e intensidad sonora debido al intervalo en frecuencia de 250 Hz a 500 Hz. El análisis para encontrar la razón de estas diferencias se hará posteriormente. Sin embargo si se elimina el intervalo de 250 Hz a 500 Hz, la correlación mejora notablemente a partir de la frecuencia de

Estimación del índice de reducción sonora de materiales prefabricados en una cámara de transmisión por la técnica de intensidad sonora

500 Hz. La figura 10 (Muestra C) presenta el comportamiento esperado para muestras pequeñas en este tipo de comparaciones entre R y R_I [23] [31] y corrobora lo presentado por Esquivel [12]. Las figuras 10 y 11 incluyen el uso de los tres espaciadores. La figura 12 (Muestra B) se hace considerando los espaciadores: de 50 mm y 12 mm, mientras que la figura 13 (muestra A) es únicamente con el espaciador de 12 mm. Como puede observarse de estas gráficas, es importante realizar una medición y procesar los datos antes de modificar algún parámetro para volver a medir. La secuencia de uso de los espaciadores quedaría como 12 mm, posiblemente 50 mm y, de ser necesario, 6 mm. Si no existen demasiados problemas de montaje y fuga es probable que las mediciones con el espaciador de 12 mm queden dentro de los límites de la medición. Para una mejor estimación de R_I , independientemente de su correlación con R sería interesante eliminar los puntos de medición que muestran fugas de energía sonora, como se explica en [12]. Esto reduciría el efecto del montaje en la estimación del SRI , permitiendo saber el efecto del material en sí.

6. Conclusiones y Recomendaciones

Se desarrolla en México la medición del *SRI* de construcciones o partes de construcción para sonidos de origen aéreo por medio de intensidad sonora dentro de la Cámara de Transmisión de CCADET-UNAM en el intervalo de frecuencia de 250 Hz a 5000 Hz conforme a la norma ISO 15186-1. Para una mejor estimación del *SRI*, lo más conveniente es reportar los valores de R_I y no los de $R_{I,M}$, a menos que lo que se desee sea obtener una medición por intensidad sonora equivalente a la de ISO 140-3. Las mediciones del *SRI* llevadas a cabo dentro de esta cámara de transmisión permiten concluir que para paneles dobles de material prefabricado, no existe gran diferencias entre la estimación de R_I y R al considerar muestras grandes (10 m^2). Los principales parámetros estudiados quedan como: tres o cuatro posiciones de la fuente sonora, densidad de puntos uniforme de 30 cm para la superficie de medición, separación muestra-sonda de 23 cm y uso de los espaciadores de 12 mm, 50 mm y 6 mm (de ser requeridos). Para lograr que la estimación del *SRI* de materiales ligeros dobles sea confiable y repetible, es sumamente importante seguir con detalle las recomendaciones para mediciones de ingeniería (grado 2) con intensidad sonora de la norma ISO 9614-1. Debido a la forma irregular de la Cámara de Transmisión del CCADET-UNAM, se requiere un mayor estudio para estimar su mejor corrección de Waterhouse, K_C .

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. <http://www,ruidos,org/>
2. <http://www,who,int/mediacentre/factsheets/fs258/en/>
3. ISO 140-1:1997, Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Requirements for laboratory test facilities with suppressed flanking transmission,
4. V, Hongisto; K, Nieminen; H, Koskela; V, Viljanen; and M, Lindaren, Test procedure and automatic system for sound insulation measurement using sound intensity method, *Noise Control Eng*, 45(2), 1997 Mar-Apr,
5. V, Hongisto; M, Lindaren and J, Keränen, Enhancing maximum measurable sound reduction index using sound intensity method and strong receiving room absorption, *J, Acoust, Soc, Am*, 109(1), January 2001,
6. R,E, Halliwell and C,C, Warnock, Sound transmission loss: Comparison of conventional techniques with sound intensity techniques, *J, Acoust, Soc, Am*, 77(6), June 1985,
7. ISO 9614-1:1996, Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity -- Part 1: Measurement at discrete points,
8. ISO 15186-1:2000, Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity -- Part 1: Laboratory measurements,
9. Allan D, Pierce, *Acoustics – An introduction to its physical principles and applications*, Acoustical Society of America, 1991,
10. Leo L, Beranek, *Acoustical Measurements*, Acoustical Society of America, 1993,
11. Antoni Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Talleres Gráficos Hostench, S,A, 1998,
12. S, Gade, Validity of intensity measurements in partially diffuse sound field, *Brüel & Kjør, Technical Review* 4, pp, 3-31,
13. T, J, Schultz, Acoustic Wattmeter, *J, Acoust, Soc, Am*, 28(4), July 1956,
14. Bolt, R,H, and Petrauskas, A,A, An acoustic impedance meter for rapid field measurements, *J, Acoust, Soc, Am*, 15(1943) 79(a),

15. F,J, Fahy, Sound intensity, E& FN Spon, 1995,
16. Burger J,F,, van der Merwe, G,J,J,, van Zyl B,G, and Joffe L, Measurement of sound intensity applied to the determination of radiated sound power, J, Acoust, Soc, Am, 53(4), 1973,
17. Van Zyl B,G, and Anderson F, Evaluation of the intensity method of sound power determination, J, Acoust, Soc, Am, 57(3), March 1975,
18. C,W, Clapp and F,A, Firestone, The acoustic Wattmeter, an instrument for measuring sound energy flow, J, Acoust, Soc, Am, 13, October 1941,
19. I, Wolff and F, Massa, Direct measurement of sound energy density and sound energy flux in a complex sound field, J, Acoust, Soc, Am, 3(3), January 1932, pp, 317-318,
20. Max P, Waser and Malcolm J, Crocker, Introduction to the two-microphone cross-spectral method of determining sound intensity, Noise Control Eng, May-June 1984,
21. Finn Jacobsen and Hans-Elias de Bree, A comparison of two different sound intensity measurement principles, J, Acoust, Soc, Am, 118(3), Pt, 1, September 2005,
22. Stuart Baker, An acoustic intensity meter, J, Acoust, Soc, Am, 27(2), March 1955,
23. Finn Jacobsen and Hans-Elias de Bree, Intensity-based sound power determination under adverse sound field conditions: p-p probes versus p-u probes, Twelfth International congress on Sound and vibration, 11-14 July, 2005,
24. J,Y, Chung, Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch, J, Acoust, Soc, Am, 64(6), December 1978,
25. J,K, Thompson and D,R, Tree, Finite difference approximation errors in acoustic intensity measurements, Journal of Sound and Vibration 75(2), 1981,
26. G, Pavić, Measurement of sound intensity, Journal of Sound and Vibration 51(4), 1977,
27. U,S, Shirahatti and Malcolm J, Crocker, Studies on sound power measurements using sound intensity technique, Noise Control Eng, Sep-Oct 41(2), 1992,
28. Frédéric Laville and Jean Nicolas, A computer simulation of sound power determination using two-microphone sound intensity measurements, J, Acoust, Soc, Am, 91(4), April 1992,
29. A,F, Seybert, Statistical errors in acoustic intensity measurements, Journal of Sound and Vibration 75(4), 1981,

30. J. Pope, Validity of sound power determination using sound intensity measurements, Proceedings of 2nd International Congress on Acoustic Intensity, Senlis, France, 1985, pp, 356-360,
31. F. Jacobsen, Sound field indicators: useful tools, Noise Control Eng, July-August 35(1), 1990,
32. F. Jacobsen, A simple and effective correction for phase mis-match in intensity probes, Applied Acoustics 33, 1991,
33. E. Frederiksen, Phase characteristics of microphones for intensity probes, Proceedings of 2nd International Congress on Acoustic Intensity, Senlis, France, 1985, pp, 23-30,
34. Gerhard Hübner, Sound intensity measurement method –Errors in determining the sound power levels of machines and its correlation with sound field indicators, Proc, Inter-noise 87, pp, 1227-1230,
35. ISO 9614-1, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Part 1: Measurement at discrete points,
36. G. Krishnappa, Cross-spectral method of measuring acoustic intensity by correcting phase and gain mismatch errors by microphone calibration, J, Acoust, Soc, Am, 69(1), January 1981,
37. Adolfo Esquivel D./Guillermo Silva P, Fuentes de error en la medición de intensidad acústica por la técnica de dos micrófonos, Parte II: Desarrollo experimental, 7^o Congreso Mexicano de Acústica, Veracruz, Ver, 26 y 27 de octubre de 2000,
38. ISO 9614-2, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Par 2: Measurement by sacanning,
39. Gerhard Hübner, Developments of requirements for intensity measurement code determining sound power level of machines under (worst) *in situ* conditions, Proc, Inter-noise 84, pp, 1093-1098,
40. Gerhard Hübner, Sound intensity measurement technique – Discussion of some actual problems, Proc, Inter-noise 90, pp, 655-660,
41. Finn Jacobsen, Sound power determination using the intensity technique: state of the art, Proceedings of the third International Congress on air- and strcture-borne sound and vibration, Montreal, Canada, pp, 1023-1030, 1994,

42. Malcolm J, Crocker, P,K, Raju and Bjorn Forssen, Measurement of transmission loss of panels by the direct determination of transmitted acoustic intensity, *Noise Control Eng*, July-August 17(1), 1981,
43. André Cops and Mark Minten, Comparative study between the sound intensity method and the conventional two-room method to calculate the sound transmission loss of wall constructions, *Noise Control Eng*, May-June 22(3), 1984,
44. K,W, Walker, Measurement of sound transmission loss with a two-microphone sound intensity analyzer, *J, Acoust, Soc, Am, Suppl*, 1(76), S50, 1984,
45. K,A, Mulholland and R,H, Lyon, Sound insulation at low frequencies, *J, Acoust, Soc, Am*, 54(4), January 1973,
46. R,V, Waterhouse, Interference patterns in reverberant sound fields, *J, Acoust, Soc, Am*, 27(2), March, 1955,
47. A, Cops, M, Minten and H, Myncke, Influence of the design of transmission rooms on the sound transmission loss glass – intensity versus conventional method, *Noise Control Eng*, May-June 28(3), 1987,
48. Roman Vinokur, Mechanism and calculation of the niche effect in airborne sound transmission, *J, Acoust, Soc, Am*, 119(4), April 2006,
49. B,G, Van Zyl and P,J, Erasmus, Application of sound intensimetry to the determination of sound reduction indices in the presence of flanking transmission, *Proceedings of 2nd International Congress on Acoustic Intensity*, Senlis, France, 1985, pp, 555-560,
50. B,G, van Zyl, P,J, Erasmus, Sound transmission analysis in reactive fields by sound intensimetry, *Noise Control Eng*, May-June 28(3), 1987,
51. B,G, van Zyl, P,J, Erasmus and F, Anderson, On the formulation of the intensity method for determining sound reduction indices, *Applied Acoustics* 22, 1987,
52. Joseph C,S, Lai and Dan Qi, Sound transmission loss measurements using the sound intensity technique part 1: The effects of reverberation time, *Applied Acoustics* 40, 1993,
53. G, Maidanik, Response of ribbed panels to a reverberant acoustic field, *J, Acoust, Soc, Am*, 37(6), 1962, pp, 809-

54. Nic Michelsen, Effect of size on measurements of the sound reduction index of a window or a pane, *Applied Acoustics* 16, 1983, pp, 215-234,
55. R,W, Guy, A, De Mey and P, Sauer, The effect of some physical parameters upon the laboratory measurements of sound transmission loss, *Applied Acoustics* 18, 1985, pp, 81-98,
56. M, Machimbarrena and F, Jacobsen, Is there a systematic disagreement between intensity-based and pressure-based sound transmission loss measurements?, *J, Building Acoustics* 6(2), 1999, pp, 101-111,
57. Finn Jacobsen, Vicente Cutanda and Peter M, Juhl, A numerical and experimental investigation of the performance of sound intensity probes at high frequencies, *J, Acoust, Soc, Am*, 103(2), February 1998,
58. Valtteri Hongisto, Airborne sound insulation of wall structures – measurement and prediction methods, Dissertation for the degree of Doctor of Sciences in Technology, Helsinki University of Technology, 2000,
59. IEC 61043, Electroacoustics - Instruments for the measurement of sound intensity - Measurements with pairs of pressure sensing microphones,
60. ISO 140-3: 1995, Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements,
61. ISO 140-2: 1991, Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 2: Determination, verification and application of precision data,
62. P, Fausti, R, Pompoli and R, Smith, An intercomparison of laboratory measurements of airborne sound insulation of lightweight plasterboard walls, *J, Building Acoustics* 6(2), 1999, pp, 127-140,
63. Robert E, Jones, Intercomparisons of laboratory determinations of airborne sound transmission loss, *J, Acoust, Soc, Am*, 66(1), July 1979,
64. R,S, Smith, R, Pompoli and F, Fausti, An investigation into the reproducibility values of the European inter-laboratory test for lightweight walls, *J, Building Acoustics* 6(3-4), 1999, pp, 187-210,

65. Finn Jacobsen, Measurement of sound intensity, The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, Report No, 28, 1979,
66. Morse, P,P, and Ingard, K,U, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, Inc., 1968,
67. IEC 61094-3, Measurement microphones - Part 3: Primary method for free-field calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique,
68. G, Rasmussen, M, Brock, Acoustic intensity measurement probe, Proceedings of Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement, Senlis, France, 1981, pp, 81-88,
69. G, Krishnappa, Interference effects in the two microphone technique of acoustic intensity measurements, Noise Control Eng, November-December 21(3), 1983,
70. M, Villot, T,W, Bartel and S,L, Yaniv, Uncertainties in the cross-spectral method for acoustic intensity under semireverberant conditions, J, Acoust, Soc, Am, 79(3), March 1986,
71. K,S,K, Wong, Precision method for phase match of microphones, J, Acoust, Soc, Am, 90(3), September 1991,
72. M, Ren and F, Jacobsen, A simple technique for improving the performance of intensity probes, Noise Control Eng, January-February 38(1), 1992,
73. F, Jacobsen, Active and reactive, coherent and incoherent sound fields, Journal of Sound and Vibration 130(3), 1989,
74. F, Fahy, Foundations of engineering acoustics, Academic Press, 2001,
75. F, Jacobsen, The sound field in a reverberation room, Acoustic Technology, Ørsted, Technical University of Denmark, Nota No, 31261, 2006,
76. ISO 354 Reverberation time,
77. L, Cremer and M, Heckl, Structure-borne sound, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1973,
78. F, Fahy, Sound and structural vibration – Radiation, transmission and response, Academic Press, 1985,
79. J,D, Quirt, Sound transmission through windows, I, Single and double glazing, J, Acoust, Soc, Am, 72(3), September 1982,
80. ASTM E90

81. ISO 15186-2, Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity -, Part 2: Field measurements,
82. Adolfo Esquivel D, y Rogelio Amezola L, Caracterización acústica del calibrador de intensidad B&K 3541 conforme a la IEC 1043, 7º Congreso Mexicano de Acústica, Veracruz, Ver, 26 y 27 de octubre de 2000,
83. ISO 140-4
84. M,R, Schroeder, The Schroeder frequency revisited, J, Acoust, Soc, Am, 99(5), May 1996,
85. S, Uosukainen, Measurement of element normalized level difference of small building elements with intensity technique, Technical Research Centre of Finland, ESPOO 1995, VTT Publications 262,
86. H,G, Jonasson, Sound intensity and sound reduction index, Applied Acoustics 40, 1993, pp, 281-293,
87. Adolfo Esquivel D, & J, Noé Razo R, Caracterización de la cámara de transmisión del CCADET-UNAM en base a la norma ISO 140-1 e ISO 140-3, Informe interno, CENAM, octubre 2006,
88. Adolfo Esquivel Delgado, Condiciones para crear un ambiente de campo libre dentro de un recinto acondicionado, VI Congreso Mexicano de Acústica, Oaxaca, Oax., 1999,
89. A, Pérez; E, Palacios González y S,J, Pérez Ruiz, Fuente sonora omni-direccional, Revista Mexicana de Física 52(2), Abril 2006,
90. Esquivel-Delgado A,; Pérez-Matzumoto A,E, y Pérez- J,S, **CIINDET 2007**,