

Importancia de las Variables Experimentales en la Estimación del Índice de Reducción Sonoro por la Técnica de Intensidad Acústica

Esquivel-Delgado, A.,^a Pérez-Matzumoto, A. E.,^a Pérez Ruiz, S. J.^b

^a Centro Nacional de Metrología
km 4,5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, México.
aesquive@cenam.mx

^b Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, Distrito Federal, México.

RESUMEN

Actualmente existen dos técnicas normalizadas para la evaluación del índice de reducción sonora (SRI – por sus siglas en inglés) de muros divisorios en edificios: el método de presión sonora y la técnica de intensidad acústica. Las variables experimentales que tienen influencia sobre el valor del SRI, en el método de intensidad acústica son: 1) posiciones de la fuente sonora, 2) espaciador de micrófonos, 3) distancia muestra-sonda, 4) densidad de puntos de medición necesarios, 5) montaje de la muestra y 6) absorción en el cuarto receptor. En el presente trabajo se analiza la influencia de las primeras cuatro variables comparando los valores del SRI con aquellos obtenidos por el método de presión sonora, midiendo tres diferentes materiales en la cámara de transmisión sonora del CCADET-UNAM.

Los resultados obtenidos nos permiten afirmar que -bajo condiciones de laboratorio, con un tiempo de reverberación muy bajo en el cuarto receptor y con un montaje adecuado de la muestra-, las variables posición de la fuente sonora, distancia muestra-sonda y densidad de puntos de medición no tienen un efecto significativo sobre el valor del SRI. Además, es posible emplear el espaciador de micrófonos de 12 mm sin arriesgar la exactitud de la medición en el intervalo de frecuencia de 200 Hz a 6.3 kHz.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación del aislamiento sonoro para construcciones y elementos de construcción se realiza por medio del índice de reducción sonora y la estimación de éste bajo condiciones de laboratorio se logra principalmente mediante la determinación de la potencia sonora en dos 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 incidente a la pared bajo evaluación. En el otro cuarto (denominado como cuarto receptor) se estima la potencia sonora W_2 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 del lado emisor y que no hay energía retransmitida del cuarto receptor al cuarto fuente, la diferencia de la potencia sonora entre ambos cuartos nos indica el valor de SRI conforme a la Ec. (1):

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \text{ (dB)}. \quad (1)$$

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 o al cuarto receptor directamente. La estimación de la potencia sonora es posible a partir de las mediciones de presión sonora, aunque un método alternativo normalizado denominado intensidad acústica es actualmente usado [1].

Las variables de medición se analizaron en tres diferentes muestras ligeras denominadas tabla-cemento A, tabla-cemento B y tabla-cemento C, con una densidad superficial de 12,30 kg/m²; 12,23 kg/m²; y 15,21 kg/m²; respectivamente. La muestra de prueba fue una muestra doble formada por dos paneles separados por un espacio de aire de 6 cm [2]. Para evitar que el montaje fuera un factor significativo en los valores del SRI, se recurrió a un contratista con más de cinco años de experiencia en

el montaje de paneles prefabricados. Una descripción más detallada del montaje es dada por Esquivel [2]. Para cada material montado, primeramente se llevaron a cabo las mediciones por el método convencional, que fueron realizadas por personal del CCADET-UNAM. Posteriormente se hicieron las mediciones basadas en intensidad sonora por personal del CENAM. Este proceso se repitió para cada diferente tipo de material medido. El equipo usado en la medición de intensidad sonora es clase 1 conforme a la norma internacional IEC 61043 [3]. Los micrófonos y equipos usados en esta medición cuentan con certificados de calibración recientes emitidos por el CENAM. La estimación de R realizada por Moreno [4] es la referencia para su comparación con los valores del SRI obtenidos por la técnica de intensidad sonora R_I . Las mediciones de R_I fueron realizadas conforme se indica en la normatividad para intensidad sonora: ISO 15186-1 [5] e ISO 9614-1 [1].

Las mediciones de R se realizaron en el intervalo de frecuencia de 200 Hz a 5 kHz, y las mediciones de R_I se extendieron hasta 6,3 kHz con el espaciador de 12 mm. Las posiciones de la fuente sonora y la trayectoria de micrófono en el recinto fuente están indicadas en Esquivel [2]; asimismo, se encuentra descrita la forma en que se definió la discretización de la superficie de medición para la distancia entre puntos de 15 cm (357 puntos de medición) y 30 cm (99 puntos de medición).

2. MÉTODO CLÁSICO DE ESTIMACIÓN DEL AISLAMIENTO SONORO

El término aislamiento acústico usualmente implica la reducción neta de sonido que ocurre cuando éste es transmitido por todas las posibles trayectorias de sonido. Mientras que el término índice de reducción sonora aplica solamente a particiones y define la característica inherente del material de una partición de resistir la transmisión de sonido en determinada frecuencia [6] [7].

La estimación del SRI basada en la presión sonora es considerada el método clásico. Y los laboratorios construidos para la estimación de R se les conoce 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 [8] e ISO 140-3 [9] pertenecen al CCADET-UNAM [10].

Países con un mayor número de instalaciones de este tipo publican valores típicos de R para materiales y construcciones de uso frecuente para ellos. 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 encontrados en la mayoría de la literatura no incluyen materiales de uso generalizado en México; ni detalles del montaje.

De forma genérica, para aumentar el valor de R se introduce una capa de aire y/o material absorbente entre dos paneles. Las paredes ligeras de materiales prefabricados están generalmente construidas bajo este concepto de panel doble. Sharp [11] 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 [12] [13].

Además del problema de montaje de la muestra, la norma ISO 140-3 [9] considera los problemas de variaciones espaciales de la energía acústica en ambos cuartos (fuente y receptor). Este problema aumenta a bajas frecuencias, pues en esta región se pierde la difusividad de los cuartos debido a que la densidad modal es baja, y por tanto la relación entre potencia y presión acústica para campo reverberante necesaria para la determinación del SRI ya no es del todo válida [14]. Una corrección sugerida para la optimización a bajas frecuencias del SRI es la corrección de Waterhouse, la cual toma valores apreciables en recintos pequeños a bajas frecuencias. De esta manera, para comparar valores del SRI obtenidos por el método de presión y la técnica de intensidad, la norma 15186-1 [5] sugiere sumar la corrección de Waterhouse a los resultados dados por la técnica de intensidad.

Otro problema importante es la transmisión de potencia sonora del cuarto fuente al cuarto receptor por trayectorias diferentes a la pared bajo medición, fenómeno conocido por flanqueo [15]. Otro factor básico que puede influir la medición es la superficie total del material bajo prueba y su absorción sonora [16-18].

La determinación de R se hace a través de la ecuación que está derivada en [10] y que aparece en ISO 140-3 [9], la cual a partir de la Ec. (1) queda como:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A_r} \right), \quad (2)$$

donde L_1 es el nivel de presión sonora promedio en el cuarto fuente, dB re 20 μ Pa, L_2 es el nivel de presión sonora promedio en el cuarto receptor, dB re 20 μ Pa, y S es el área del espécimen bajo prueba, m^2 .

En base a la norma ISO 354 [19], el área de absorción sonora equivalente se obtiene de:

$$A_r = 0,163 \cdot \frac{V_r}{T_{60}}, \quad (3)$$

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

3. 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 [20]. La técnica de Intensidad acústica requiere un recinto receptor poco reverberante para aumentar la exactitud del índice de reducción sonora. La posibilidad de usar el equipo estándar de medición de intensidad sonora para la estimación del SRI fue verificada por B. G. van Zyl [21]. El Anexo A de la norma ISO-9614-1 [1] describe la manera de calcular cuatro indicadores de campo, 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 [5] donde se indica usar un grado de exactitud 2 para la medición de potencia sonora, conforme a [1]. La fuente sonora, la señal de excitación, las posiciones de la fuente sonora y el procedimiento de medición en el cuarto fuente deben cumplir con lo especificado en ISO 140-3 [9]. Se debe estimar el indicador de presión-Intensidad superficial (global) F_{pl} (llamado F_2 en ISO 9614-1 [1]) dado por:

$$F_{pl} = L_p - L_{in}, \quad (4)$$

donde L_{in} es el nivel de intensidad acústica promedio sobre la superficie de medición en el cuarto receptor, dB re 10^{-12} W/ m^2 , L_p es el nivel de presión sonora superficial, dB re 20 μ Pa.

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

Desde el momento que se empleó intensidad acústica para determinar el SRI, las diferencias entre los valores estimados conforme al método convencional normalizado (presión sonora) e intensidad acústica, empezaron a surgir en la literatura [22]. Un ejemplo de estas diferencias se puede encontrar en el anexo A de ISO 15186-1 [5], donde se ejemplifica una sobreestimación del índice de reducción sonora modificado $R_{I,M}$ con respecto a R que es medido conforme a ISO 140-3 [9]. $R_{I,M}$ está definido como:

$$R_{I,M} = R_I + K_C \text{ (dB)}, \quad (5)$$

donde R_I es el índice de reducción sonora por intensidad, dB, K_C es el término de adaptación, conocido como la corrección de Waterhouse, dB.

La corrección de Waterhouse K_C está definida como:

$$K_C = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{S_{b2} \lambda}{8V_r} \right), \quad (6)$$

donde S_{b2} es el área de todas las superficies en el cuarto receptor, m^2 , V_r es el volumen del cuarto receptor, m^3 , λ es la longitud de onda de la frecuencia, m.

Estrictamente, los valores de R_I no requieren de esta corrección, sino que la norma solo sugiere aplicarlos cuando el objetivo es compararlos con los valores medidos bajo el método convencional.

La derivación de R_I se puede encontrar en [10]. La ecuación final en ISO 15186-1 [5] es:

$$R_I = L_1 - 6 - \left[L_{in} + 10 \log_{10} \left(\frac{S_m}{S} \right) \right], \quad (7)$$

donde L_1 es el nivel de presión sonora promedio en el cuarto fuente, dB re 20 μ Pa, S_m es el área total de la superficie de medición, m^2 .

La mayoría de las diferencias reportadas en la literatura entre R y $R_{I,M}$ son con base a las estimaciones realizadas para muestras pequeñas, con las Ecs. (3) y (6) o (3) y (8) en un mismo recinto y el mismo material, como se ejemplifica en el anexo A de ISO 15186-1 [5], el cual está basado en el trabajo de Jonasson [23]. En dicho estudio, se menciona que el *round-robin* fue para dos ventanas de acero de una y dos capas de metal.

Es importante resaltar que la corrección de Waterhouse, Ec. (7), es desarrollada para recintos rectangulares. Waterhouse [14] indica que un problema de este tipo de recintos es la distribución no uniforme a bajas frecuencias de la energía acústica en el cuarto fuente y que esta distribución excita de manera no uniforme la muestra a medir. Mey y Guy [24], encontraron diferencias mayores a 2 dB entre R y R_I a bajas frecuencias para muestras cuadradas de 1,30 m^2 2,31 m^2 , usando recintos rectangulares fuente y receptor de 94 m^3 y 32 m^3 , respectivamente. La diferencia entre ambos métodos se aprecia debajo de la frecuencia de Schroeder del recinto fuente, la cual es de 250 Hz.

El tiempo de reverberación no tiene gran influencia en la medición, siempre que el indicador de campo F_2 se encuentre dentro de lo sugerido por la norma ISO 9614-1 [1]. Recientemente, Hongisto [23] 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_I se aumenta la absorción en el cuarto receptor, aproximándolo a las condiciones ideales de un campo anecoico.

4. 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. 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 [26]

de la norma ISO 140-1 [8] para aperturas de prueba de paneles ligeros dobles. Debido a su forma irregular, no es directa la aplicación de la teoría de campo difuso (corrección de Waterhouse y teoría modal) desarrollada para recintos reverberantes rectangulares. Aunque, debido a que en este trabajo no es el propósito realizar dicho análisis, se aplica directamente la teoría desarrollada para recintos rectangulares.

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 m^2 [8]. Para las mediciones del material prefabricado, 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 m^3 y 71,05 m^3 respectivamente. Una descripción detallada de la Cámara de Transmisión del CCADET-UNAM se encuentra en [2, 4].

Las variables, y su nomenclatura, de la medición de intensidad para la estimación del índice de reducción sonora en la cámara de transmisión se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables de la medición de intensidad para estimación del índice de reducción sonora en la cámara de transmisión.

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

La designación del índice de reducción sonora queda como $R_{I,ijk}$, 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. De la misma manera es designado el indicador de campo $F_{2,ijk}$ para cada una de las mediciones. La designación de $R_{I,M,ijk}$ es solo para indicar que se aplicó la corrección de Waterhouse.

En la Fig. 1 se muestra el comportamiento de $R_{I,12k}$ para las cuatro posiciones de la fuente sonora dentro del recinto fuente, un espaciador de micrófonos de 12 mm, una distancia muestra-sonda

de 20 cm y una discretización de 30 cm. Asimismo, en la Tabla 2 se muestran los valores de los indicadores de campo F_2 de dichas mediciones, y el índice de capacidad dinámica L_d usando el espaciador de 12 mm.

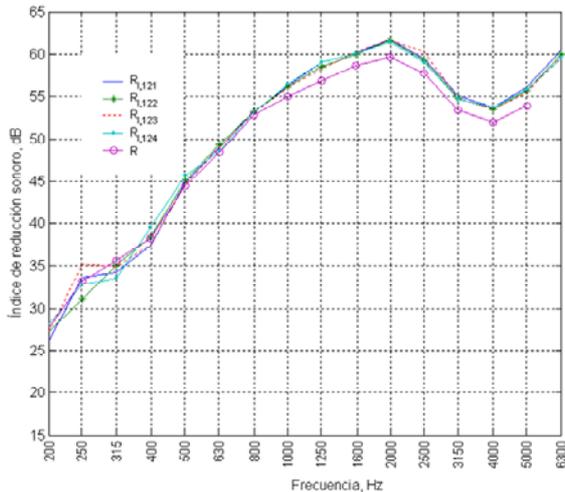


Fig. 1. Comparación del índice de reducción sonora entre el método convencional y la técnica de intensidad acústica para cuatro posiciones de la fuente sonora. Material Tabla-cemento A.

Tabla 2. Indicador de campo $F_{2,12k}$ para las cuatro posiciones de la fuente sonora. Material Tabla-cemento A.

Frec. Hz	L_d	Posición de la fuente sonora			
		1	2	3	4
200	12,9	5,42	5,35	5,66	5,65
250	13,9	5,50	5,66	5,94	5,91
315	13,4	6,17	5,86	6,65	6,25
400	13,4	6,32	6,15	6,53	6,36
500	14,1	6,69	6,47	6,85	6,53
630	14,3	6,87	7,12	7,08	6,78
800	16,0	7,16	7,16	7,32	6,94
1 000	13,3	7,08	7,37	7,24	7,18
1 250	12,6	6,98	7,20	7,2	7,29
1 600	11,7	7,24	7,23	7,55	7,32
2 000	13,2	7,40	7,82	7,84	7,70
2 500	12,6	7,11	7,24	7,93	7,10
3 150	12,5	6,52	6,45	6,44	6,29
4 000	12,2	5,97	5,90	5,90	5,85
5 000	12,4	5,82	5,73	5,72	5,65
6 300		5,88	5,63	5,71	5,52

La Fig. 2 indica los valores de $R_{I,i32}$ y $R_{I,M,i32}$ para los espaciadores de micrófonos de 12 mm y 50 mm, para una distancia muestra-sonda de 23 cm y la posición 2 de la fuente sonora del material tabla-

cemento B. Los valores del indicador de campo F_2 de estas mediciones están dados en la Tabla 3.

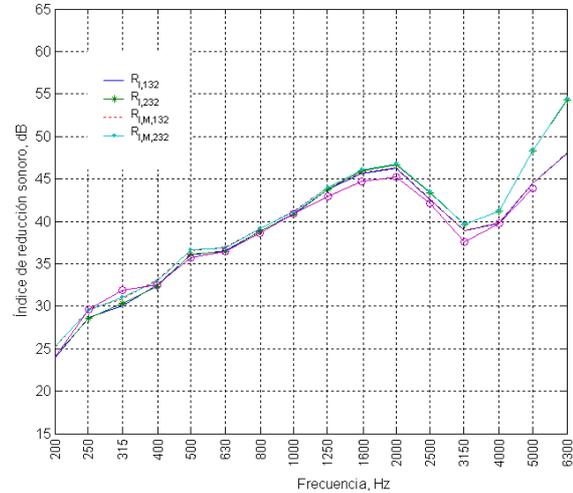


Fig. 2. Comparación del índice de reducción sonora entre el método convencional y la técnica de intensidad acústica para dos espaciadores de micrófonos. Material tabla-cemento B.

Tabla 3. Indicador de campo $F_{2,13k}$ para dos espaciadores de micrófonos. Material tabla-cemento B

Frec. Hz	L_d	$F_{2,132}$	$F_{2,232}$
200	19,1	5,88	5,62
250	20,1	6,13	6,08
315	19,6	6,25	6,10
400	19,6	6,46	6,25
500	20,3	6,32	6,24
630	20,5	6,35	5,91
800	22,2	6,53	6,41
1 000	19,5	6,31	6,20
1 250	18,8	6,15	6,06
1 600	17,9	6,23	6,09
2 000	19,4	6,15	5,86
2 500	18,8	5,86	5,63
3 150	18,7	7,17	7,11
4 000	18,4	5,56	5,35
5 000	18,6	4,66	4,93
6 300		5,17	8,19

En la Fig. 3 se muestran los valores de $R_{I,1j4}$ usando un espaciador de micrófonos de 12 mm en la posición 4 de la fuente sonora en el cuarto fuente, así como los valores promedio de R , de la muestra de prueba tabla-cemento C para dos distancia muestra-sonda.

El indicador de campo F_2 de estas mediciones es dado en la Tabla 4.

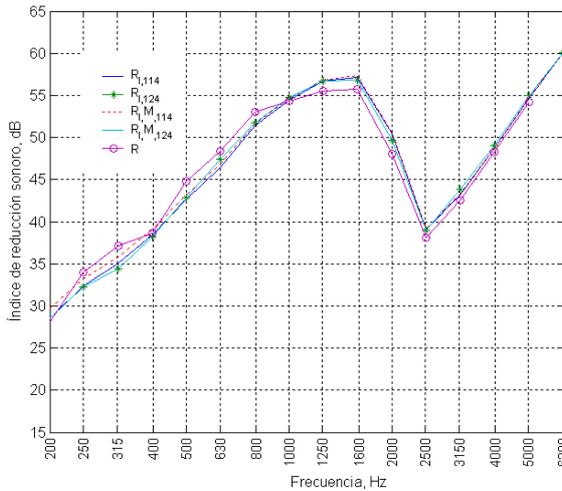


Fig. 3. Comparación del índice de reducción sonora entre el método convencional y la técnica de intensidad acústica para dos distancias muestra-sonda. Material tabla-cemento C.

Tabla 4. Indicador de campo F_2 para dos distancias muestra-sonda. Material tabla-cemento C.

Frec. Hz	$F_{2,114}$	$F_{2,131}$	$F_{2,132}$	$F_{2,133}$	$F_{2,134}$
200	6,27	5,61	5,54	5,58	5,84
250	6,15	5,51	5,78	5,47	5,72
315	7,72	5,98	5,97	6,44	6,40
400	7,75	6,48	6,34	6,5	6,44
500	7,38	7,24	6,72	7,06	6,71
630	7,15	6,65	7,06	6,57	6,80
800	7,52	6,94	7,08	7,03	6,81
1000	7,5	7,06	7,06	6,86	6,86
1250	7,76	6,82	7,33	7,11	6,80
1600	8,25	7,08	7,34	7,01	6,95
2000	8,89	7,17	7,46	7,16	7,20
2500	8,02	7,15	7,02	6,77	6,98
3150	5,22	5,33	5,1	5,16	5,23
4000	3,54	3,55	3,61	3,57	3,57
5000	3,8	3,8	3,95	3,81	3,83
6300	4,36	4,14	4,65	4,12	4,25

En la Fig. 4 se muestran los valores de R_I para varias posiciones de la fuente sonora, una distancia muestra-sonda de 23 cm y un espaciador de micrófonos de 12 mm. Para la posición 2 de la fuente sonora la discretización de la superficie de medición es cada 15 cm. Los valores del indicador de campo son mostrados en la Tabla 4. Los valores de $F_{2,132}$ son para una discretización de la superficie de medición de 15 cm.

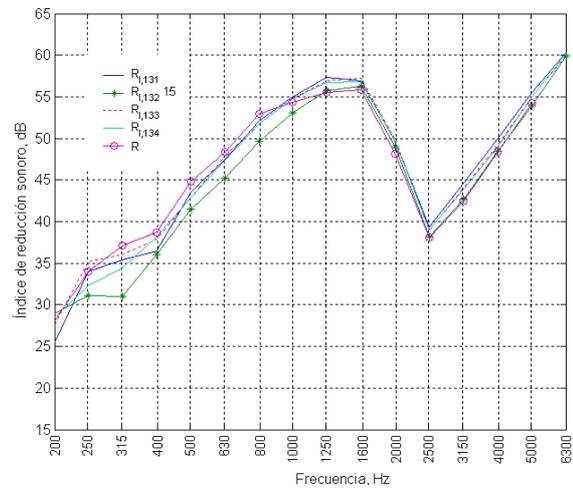


Fig. 4. Comparación del índice de reducción sonora entre el método convencional y la técnica de intensidad acústica para dos discretizaciones de la superficie de medición (15 cm y 30 cm). Material tabla-cemento C.

5. DISCUSIONES

Es conveniente comentar sobre la confiabilidad de las mediciones en base a los indicadores de campo sugeridos por la norma ISO 9614-1 [1]. Se observa de la Tabla 2 que el sistema de medición de intensidad acústica con los espaciadores de 12 mm y 50 mm está dentro de los requerimientos de la norma IEC 61043 [3] en cuanto al índice presión-intensidad residual para equipo clase 1, en el intervalo de frecuencia de 200 Hz a 5 kHz. La norma ISO 9614-1 [1] sugiere que $F_2 < L_d$. De las Tablas 2 a 4, se aprecia que dicha condición se cumplió en todas las mediciones realizadas.

Para la variable posición de la fuente sonora, se observa que para el material tabla-cemento A, los valores de R_I a bajas frecuencias (sin la corrección de Waterhouse) están ligeramente por debajo de aquellos obtenidos por el método de presión, y más altas a partir de la frecuencia de 630 Hz en tercios de octava, ver Fig. 1. Las curvas de $R_{I,M}$ con la corrección de Waterhouse se acercan a los valores de R a bajas frecuencias, aunque en la frecuencia de 250 Hz $R_{I,M}$ llega a igualar el valor de R , ver Fig. 2.

En términos generales, a partir de las Figs. 1 y 4, y con base en los resultados reportados en [2], las mayores desviaciones estándar ($\leq 1,7 dB$) de R_I para las tres particiones de prueba se presentan en el

intervalo de frecuencia de 200 Hz a 400 Hz; aunque es preciso señalar que en la frecuencia de 250 Hz el valor obtenido de R_I , para las tres particiones, es ligeramente mayor cuando la fuente sonora se ubica en la posición 3. Se presupone que debido a la baja densidad modal del recinto a frecuencias por debajo de la frecuencia de 400 Hz [2], el índice de reducción sonora promedio por debajo de esa frecuencia tendrá variaciones debido a que en un cuarto pequeño rectangular las diferentes posiciones de la fuente sonora excitarán distintos modos del recinto.

En cuanto a la variable espaciador de micrófonos, en la Fig. 2 R_I para ambos espaciadores está por debajo de R en la frecuencia de 250 Hz y 315 Hz, pero a 200 Hz y de 400 Hz a 1 kHz tienen prácticamente los mismos valores. Para frecuencias superiores a 1 kHz, R_I presenta valores mayores a R . Por tanto, se observa que al aplicar la corrección de Waterhouse a los valores de R_I , estos se acercan más a los valores de R a bajas frecuencias.

Al graficar la ecuación (encontrada en la literatura relacionada) para los espaciadores de 12 mm y 50 mm, es posible observar que la intensidad acústica a altas frecuencias es subestimada por el espaciador de 50 mm, entonces teóricamente se esperaría que R_I fuese sobreestimada si las mediciones de intensidad se realizaran con un espaciador de 50 mm a esas frecuencias. Este comportamiento de R_I se observa en la figura 2 para el espaciador de 50 mm. Considerando la condición $k\Delta r < 1,2$ dada por Fahy [20], con la cual se asegura que el error por aproximación de diferencia-finita es menor a 1 dB se encuentra que el límite de frecuencia superior es de 1,25 kHz y 5 kHz para los espaciadores de 50 mm y 12 mm, respectivamente. De forma general, se aprecia en la Fig. 2 que a frecuencias por arriba de 1,6 kHz la diferencia del SRI entre ambos espaciadores de micrófonos comienza a incrementarse.

A partir del grado de exactitud considerado es posible calcular los valores del índice presión-intensidad residual del sistema de medición dados en las Tablas 2 y 3 (que son relativamente más bajos que los sugeridos por la norma IEC 61043 [3]). Así, a partir de los límites de frecuencia inferior teóricos para los espaciadores de 12 mm y 50 mm, no se esperaría una subestimación significativa de la intensidad acústica a bajas frecuencias con el

espaciador de 12 mm a partir de la frecuencia de 200 Hz, ver Fig. 2.

Por otra parte, la forma y discretización de la superficie de medición depende de la complejidad del campo acústico producido por la fuente sonora bajo estudio (partición de prueba) y fuentes sonoras extrañas (fuentes sonoras que no corresponden a la de medición). La variación observada en la figura 4 del índice de reducción sonora R_I entre posiciones de la fuente sonora y discretización de la superficie de medición para el material tabla-cemento C, hacen suponer que existen problemas de flanqueo dado principalmente por el montaje deficiente de la partición de prueba [2].

Conforme a los resultados mostrados en la figura 4 del material tabla-cemento C, una de las posibles explicaciones al comportamiento del SRI a bajas frecuencias (≤ 400 Hz) cuando la fuente sonora se ubica en la posición 2, es que se exciten modos del recinto que no son excitados en las otras posiciones de la fuente sonora. Razón por la cual, y basados en que Esquivel [2] menciona que dicho comportamiento solo fue observado en dicha partición de prueba, un ligero deterioro en el montaje de la partición produce del lado receptor una distribución de la energía acústica diferente.

6. CONCLUSIONES

Se desarrolla en México la estimación del índice de reducción sonora mediante la técnica de intensidad acústica bajo condiciones de laboratorio en la cámara de transmisión del CCADET-UNAM en el intervalo de frecuencia de 200 Hz a 6,3 kHz.

El comportamiento de las curvas del índice de reducción sonora por el método convencional y la técnica de intensidad acústica es muy semejante a lo presentado por varios autores [10, 13, 22]; es decir, los valores del SRI obtenidos por la técnica de intensidad son más bajos a bajas frecuencias y ligeramente más altos a altas frecuencias que los obtenidos por el método de presión. Al aplicar la corrección de Waterhouse a los valores del SRI obtenidos por el método de intensidad, con la expresión sugerida en la norma ISO 15186-1 [5], la diferencia entre los valores del SRI obtenidos por ambos métodos se disminuye a bajas frecuencias. Aunque las diferencias encontradas, en la mayoría de las mediciones quedan dentro de la misma incertidumbre de medición de la técnica de intensidad acústica para estimación del índice de reducción sonora.

Con base en los resultados mostrados en éste trabajo y a aquellos dados por Esquivel [2], se puede mencionar que mientras sea posible conseguir una mayor difusividad del campo acústico a bajas frecuencias (cuarto reverberante donde sus dimensiones sean relativamente grandes con respecto a la longitud de onda de la frecuencia de interés más baja), la diferencia del índice de reducción sonora entre el método convencional y la técnica de intensidad tenderá a un valor mínimo. Esto haría menos necesaria la corrección de Waterhouse.

En base a las mediciones de intensidad acústica realizadas bajo condiciones de laboratorio, se puede concluir que es posible lograr una buena exactitud de los valores del SRI con el espaciador de micrófonos de 12 mm en el intervalo de frecuencia de 200 Hz a 6,3 kHz. Esto se debe principalmente a los altos valores del índice presión-intensidad residual [2]. El uso de varias posiciones de la fuente sonora es recomendable para en la medida de lo posible detectar problemas de montaje de la muestra de prueba. Además, bajo las condiciones de prueba usadas (tiempo de reverberación en el receptor, posiciones de la fuente sonora, etc.) no es necesario aumentar la densidad de puntos de medición; es decir, una densidad de puntos de 99 es suficiente para lograr una incertidumbre dentro de lo que marca la norma ISO 140-2 [27].

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento del Fondo Mixto CONACyT-Gobierno del Estado de Querétaro.

REFERENCIAS

- [1] ISO 9614-1:1993 *Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity -- Part 1: Measurement at discrete points*, 1^{ra} Ed., (1993).
- [2] Esquivel Delgado Adolfo, Comparación del índice de reducción sonora por la técnica de intensidad acústica bajo condiciones de laboratorio e *in situ*. SEPI-ESIME-IPN. Tesis de maestría. Presentación: cuarto trimestre, (2008).
- [3] IEC 61043:1993 *Electroacoustics- Instruments for the measurement of sound intensity- Measurement with pairs of pressure sensing microphones*, 1^{da} Ed., (1993).
- [4] O. Moreno Amezcua, *Medición del aislamiento sonoro de materiales. Comparación de varias técnicas*, CCADET-UNAM, Laboratorio de Acústica Aplicada y Vibraciones. Tesis de Maestría, Ciudad Universitaria, México, (2007).
- [5] ISO 15186-1:2000 *Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity -- Part 1: Laboratory measurements*, 1^{ra} Ed., (2000).
- [6] F. Fahy, J. Walker (editors), *Fundamentals of Noise and Vibration*, E & FN Spon., Gran Bretaña, (1998).
- [7] L. J. Zeng, D. Y. Maa, M. J. Crocker. *J. Acoust. Soc. Am* 85-1, Enero (1989) pags. 178-184.
- [8] ISO 140-1:1997, *Acoustic-Measurement of sound Insulation in buildings and buildings elements- Part 1: Requirements for laboratory test facilities with suppressed flanking transmission*, 3^{ra} Ed., (1997).
- [9] 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*, 2^{da} Ed., (1995).
- [10] A. Esquivel Delgado, A. E. Pérez Matsumoto, S. J. Pérez Ruiz, 5^{to} Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, Memorias CIINDET 2007, Morelos, México, Octubre, (2007).
- [11] B. H. Sharp, *Noise Control. Eng. J.* 11-2, pp. 53-63, (1978).
- [12] F. Fahy, *Sound and Structural Vibration*. Academic Press INC., Gran Bretaña, (1987).
- [13] V. Hongisto, *Airborne sound insulation of wall structures—Measurement and prediction methods*, Helsinki University of Technology, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Report 56, Doctoral Thesis, Espoo, Finlandia, (2000).
- [14] R. V. Waterhouse, R. K. Cook., *J. Acoust. Soc. Am.*, 37-3, Marzo, pp. 424-428, (1965).
- [15] A. Mahdavi, *J. Acoust. Soc. Am.*, 92-2, Agosto, pp. 927-936, (1991).
- [16] R. W. Guy A. de Mey, P. Sauer, *Applied Acoustics* 18, pp. 81-98, (1985).
- [17] A. C. C. Warnock, R. E. Halliwell, *J. Acoust. Soc. Am.*, 80-1, Julio, pp. 206-211, (1986).
- [18] B-K. Kim, H-J. Kang, J-S. Kim, H-S. Kim, S-R Kim, *J. Acoust. Soc. Am.*, 115-5, Mayo, pp. 2100-2109, (2004).
- [19] ISO 354:2003, *Acoustics -- Measurement of sound absorption in a reverberation room*, 2^{da} Ed., (2003).
- [20] F. Fahy, *Sound Intensity*, 2nd Ed., E & FN Spon., Gran Bretaña, (1995).

- [21] B. G. van Zyl, P. J. Erasmus, *Noise Control*, Eng. J., 28-3, pp. 113-119, (1987).
- [22] R. E. Halliwell, A. C. C. Warnock, *J. Acoust. Soc. Am.*, 77-6, Junio, pp. 254-265, (1985).
- [23] H. G. Jonasson, *Applied Acoustics*, 40, pp. 281-293, (1993).
- [24] A. de Mey, R. W. Guy, *Applied Acoustics*, 20, pp. 219-236, (1987).
- [25] V. Hongisto, M. Lindgren, J. Keränen, *J. Acoust. Soc. Am.*, 109-1, Enero, pp. 254-265, (2001).
- [26] ISO 140-1 Amendment 1:2004, *Acoustic-Measurement of sound Insulation in buildings and buildings elements- Part 1: Requirements for laboratory test facilities with suppressed flanking transmission. Amendment 1: Specific requirements on the frame of the test opening for lightweight twin leaf partitions*, (2004).
- [27] ISO 140-2:1991, *Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 2: Determination, verification and application of precision data*, 2^{da} Ed., (1991).