

MEDICIÓN DEL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO IN SITU Y LA TRANSMISIÓN POR FLANCOS

COMPARACIÓN DE MÉTODOS Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES

DE BORTOLI LUCIANO - SUAREZ ALEJANDRO - TRICHARD ELOUAN

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Acoustics Measurements and Instruments, Buenos Aires, Argentina
luciano.nicolas.de.bortoli@gmail.com

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Acoustics Measurements and Instruments, Buenos Aires, Argentina
alejandronicolassuarez@hotmail.com

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Acoustics Measurements and Instruments, Buenos Aires, Argentina
elouan.trichard.etu@univ-lemans.fr

Resumen— En este informe, se lleva a cabo un análisis comparativo entre los métodos de las normas ISO 140-4 e ISO 16283 para la medición de aislamiento a ruido aéreo de una pared que separa un laboratorio de un aula, localizada en el quinto piso de la sede II de UNTREF. Se realiza un análisis de transmisión de ruido aéreo y por flancos a través del uso de acelerómetros. La comparación de métodos mostró ser favorable para el escaneo manual considerando el tiempo de medición total, sin embargo, el uso de posiciones fijas mostró ser más fiable para las mediciones con ruido de fondo bajo. Mediante el estudio de flancos se encontró que la conexión mecánica crítica del sistema está dada por el conjunto puerta-ventana de la pared divisoria.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la normativa existente, hay cuatro parámetros principales que describen el aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos. Estos son:

- Índice de reducción sonora (R').
- Sound Transmission Class (STC).
- Diferencia de niveles normalizada (D_n).
- Diferencia de niveles estandarizada (D_{nT}).

Asimismo, todos estos parámetros poseen valores globales, de forma que el aislamiento entre recintos pueda representarse con un valor único (junto a ciertas correcciones espectrales). Estos son:

- R'_{w}
- STC
- $D_{n,w}$
- $D_{nT,w}$

Existen dos normativas que determinan el procedimiento a seguir para obtener estos valores: La norma UNE-EN ISO 140-4, y la más reciente UNE-EN ISO 16283. La primera establece un método que utiliza posiciones fijas de micrófonos para obtener valores de SPL. La segunda especifica, además del mencionado, otro método alternativo. El mismo hace uso de uno o más escaneos manuales con un micrófono para obtener los niveles de presión sonora.

El objetivo de la primer parte de este trabajo es hacer una comparación entre los resultados obtenidos a través de los dos métodos y, de ser posible, evaluar la efectividad de los mismos bajo las condiciones planteadas.

En la segunda parte del informe se realiza un estudio de las vibraciones transmitidas al recinto receptor, tanto a través de la pared divisoria como de los flancos laterales. A través de esta medición, se busca encontrar dos parámetros que caracterizan al aislamiento:

- La llamada conexión mecánica crítica. Es decir, el elemento constructivo que presenta una mayor transmisión de vibraciones mecánicas.

- El factor de pérdidas de la pared divisoria. El mismo se obtiene a partir del tiempo de reverberación superficial de la misma, y se calcula como:

$$\eta = \frac{2.2}{f TR}$$

2. RUIDO AÉREO: COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS ISO 140 E ISO 16283

2.1. Resultados y diferencias obtenidos

Primero, es necesario aclarar que las diferencias obtenidas por bandas de tercio de octava son las mismas tanto para R' , como para D_n y D_{nT} . En el caso del STC, el mismo es simplemente el valor de R' redondeado al valor entero más próximo. De forma que las diferencias en valores de R' no son las mismas que en valores de STC. No obstante, la tendencia general sí es la misma. Es por esto que solo se analizará el parámetro R' , teniendo en cuenta este detalle. La figura 1 muestra los resultados obtenidos a través de los dos métodos para R' .

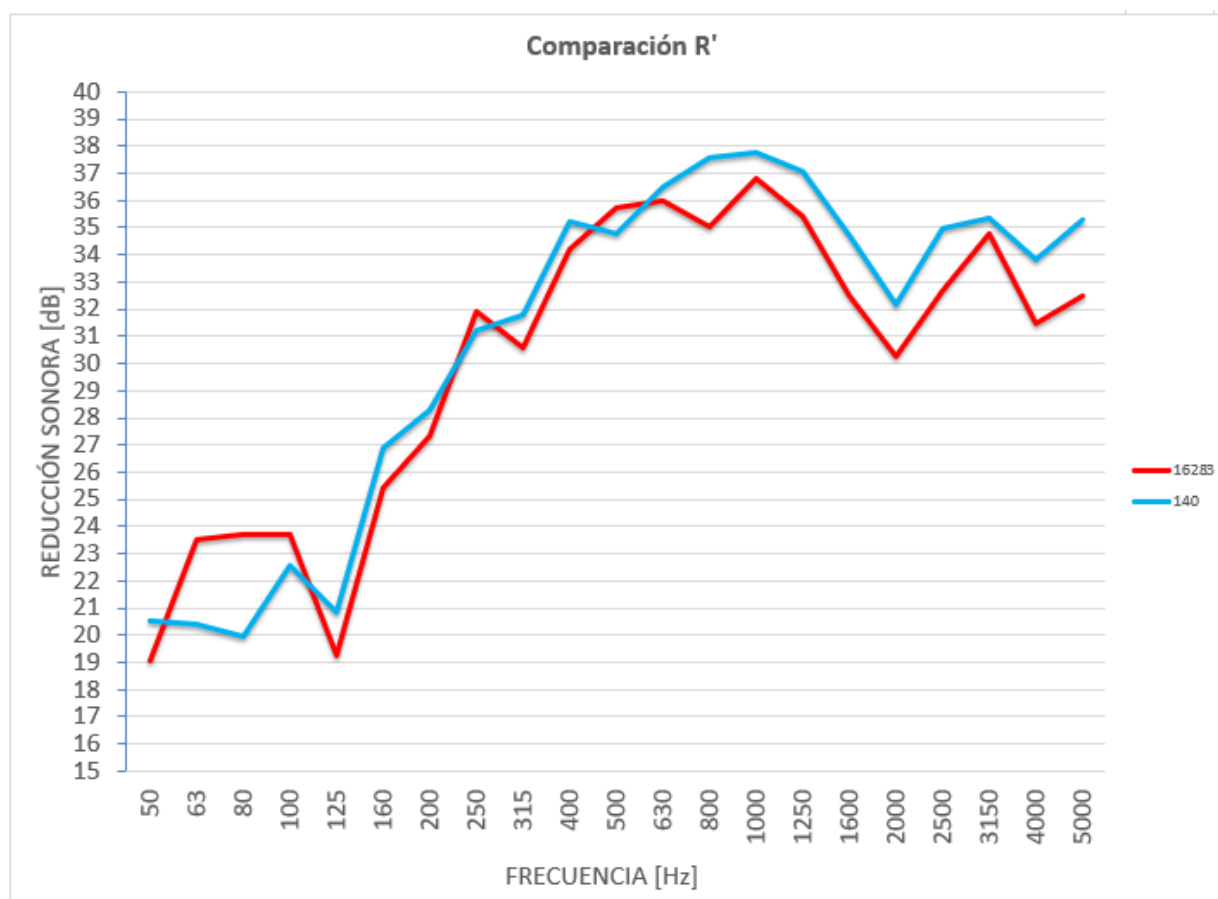


Figura 1: Gráfico comparativo de valores de R' .

A simple vista los valores obtenidos son similares. Las mayores diferencias se ven principalmente en bajas frecuencias (hasta 125 Hz) y en las bandas por encima de 630 Hz. Sin embargo, estas diferencias no son consistentes: en relación a la curva obtenida mediante posiciones fijas, el escaneo manual sobreestima el valor en bajas frecuencias y lo subestima en altas en comparación con las posiciones fijas. No obstante, la tendencia general de las curvas es similar, con las caídas relativas en el aislamiento dándose de manera casi idéntica en las dos curvas.

Para realizar un análisis más preciso, los valores numéricos y las diferencias encontradas por banda de octava se ven en la tabla 1.

Frecuencia central (Hz)	R' según ISO 140-4	R' según ISO 16283	Diferencia (dB)
50	20.5	19.0	1.5
63	20.4	23.5	3.1
80	19.9	23.7	3.8
100	22.6	23.7	1.1
125	20.9	19.3	1.6
160	26.9	25.4	1.5
200	28.3	27.3	1.0
250	31.2	31.9	0.7
315	31.8	30.6	1.2
400	35.2	34.2	1.0
500	34.8	35.7	1.0
630	36.5	36.0	0.5
800	37.6	35.0	2.5
1000	37.8	36.8	1.0
1250	37.1	35.4	1.7
1600	34.7	32.5	2.2
2000	32.2	30.3	1.9
2500	34.9	32.7	2.3
3150	35.3	34.8	0.5
4000	33.8	31.4	2.4
5000	35.3	32.5	2.8
		PROMEDIO	1.7
		DESVIO	0.9

Tabla 1: Tabla comparativa de valores de R'.

Se ve que, en promedio, hay menos de 2 dB de diferencia entre las dos curvas. Asimismo, el desvío estándar es menor a 1 dB, lo cual indica que hay relativamente poca dispersión entre resultados.

La tabla 2 muestra los valores globales obtenidos con los dos métodos.

Parámetro	ISO 140-4	ISO 16283	Diferencia (dB)
R',w	36	34	2
STC	35	33	2
Dn,w	35	34	1
DnT,w	35	34	1

Tabla 2: Tabla comparativa de valores globales.

En primer lugar, se ve que las diferencias son distintas entre parámetros cuyas diferencias en tercios de octava son iguales. Esto sucede a partir de la metodología especificada por la norma para calcular los valores globales. Lo mismo sucede con los términos de adaptación espectral obtenidos, que se ven en las tablas 3, 4, y 5.

	ISO 140-4	ISO 16283	Diferencia (dB)
C 50-3150	-2	-1	1
C 50-5000	-2	-1	1
C 100-5000	-2	-1	1
Ctr 50-3150	-4	-3	1
Ctr 50-5000	-4	-3	1
Ctr 100-5000	-3	-2	1

Tabla 3: Tabla comparativa de términos de adaptación espectral de R'.

	ISO 140-4	ISO 16283	Diferencia (dB)
C 50-3150	-1	-2	1
C 50-5000	-1	-2	1
C 100-5000	-1	-2	1
Ctr 50-3150	-4	-3	1
Ctr 50-5000	-4	-3	1
Ctr 100-5000	-3	-3	0

Tabla 4: Tabla comparativa de términos de adaptación espectral de Dn.

	ISO 140-4	ISO 16283	Diferencia (dB)
--	-----------	-----------	-----------------

C 50-3150	-1	-1	0
C 50-5000	-1	-2	1
C 100-5000	-1	-2	1
Ctr 50-3150	-3	-3	0
Ctr 50-5000	-3	-3	0
Ctr 100-5000	-2	-3	1

Tabla 5: Tabla comparativa de términos de adaptación espectral de DnT.

2.2. Análisis

Para poder analizar el porqué de las diferencias, resulta imperativo ver en qué medición en particular se ve la mayor parte de las mismas. Como todos los parámetros vistos por bandas de tercio de octava se calculan a partir de la diferencia de niveles (D) entre recintos emisor y receptor, es conveniente empezar viendo qué sucede con las niveles de nivel de presión sonora medidos en cada recinto. Para la sala emisora, los valores en dB SPL medidos se ven en la figura 2.

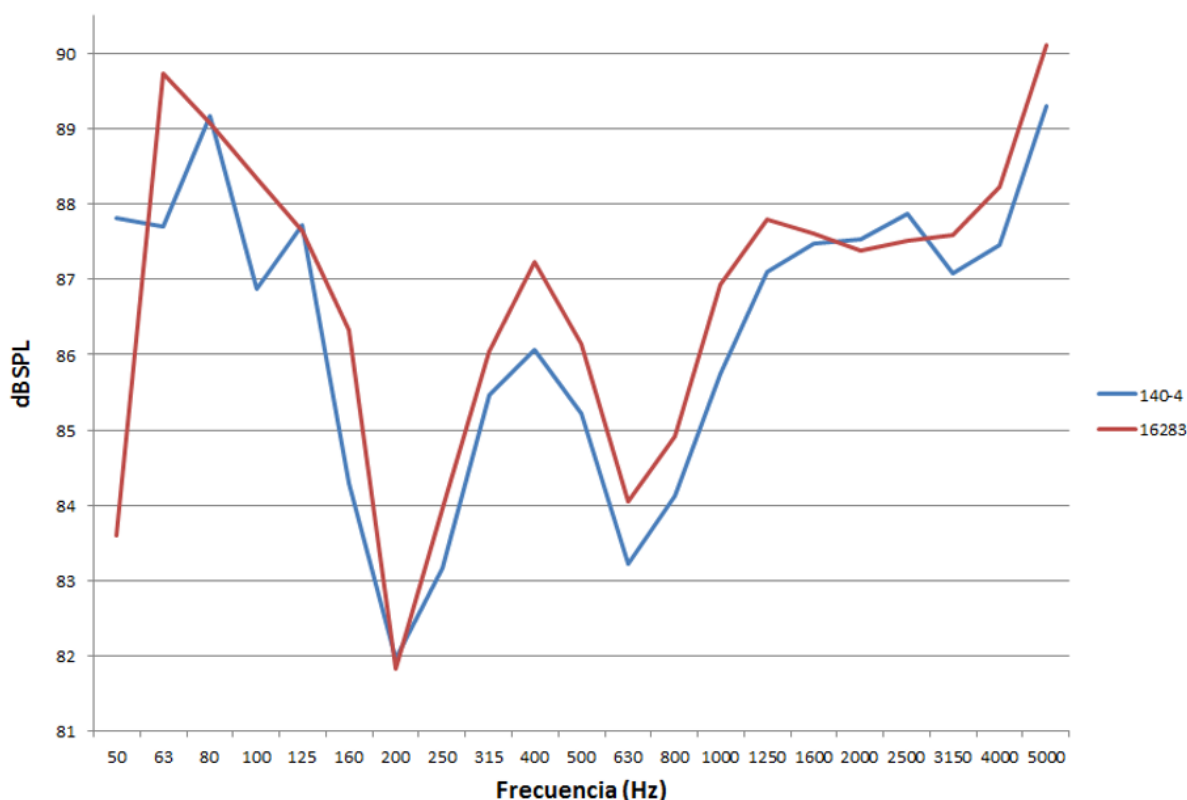


Figura 2: Valores de SPL medidos en sala emisora.

Dejando de lado los niveles en sí (que muestran caídas estridentes en las bandas de 200 y 630 Hz, posiblemente causadas por deficiencias de la fuente sonora), en líneas generales los valores medidos difieren poco: la diferencia promedio es de 0.94 dB, con un desvío estándar igual a 0.94 dB. El mayor desvío se ve en las primeras dos bandas extendidas de bajas frecuencias, en donde la diferencia es de 4.20 y 2.03 dB para 50 y 63 Hz, respectivamente. Esto puede deberse a una deficiencia en la metodología utilizada: solo se utilizaron dos posiciones de fuente en lugar de tres, que es lo que propone la norma para bandas extendidas en baja

frecuencia. Si se descartaran estas bandas, la diferencia promedio sería de 0.71 dB, con un desvío de 0.52 dB. Respecto de lo que sucede con los niveles medidos en sala receptora; los mismos se ven en la figura 3.

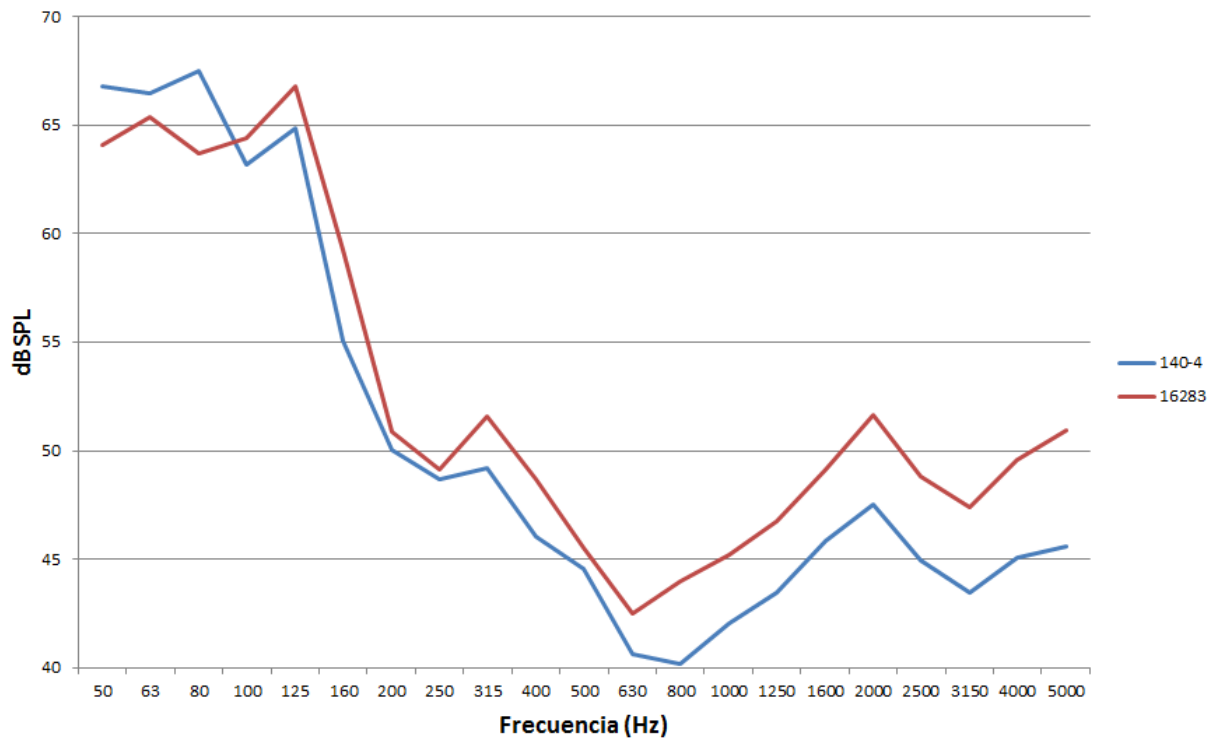


Figura 3: Niveles SPL medidos en sala receptora.

En este caso, la diferencia promedio es de 2.8 dB, con un desvío estándar de 1.4 dB. Es decir, ahora las variaciones son significativas. El comportamiento en bajas frecuencias muestra diferencias similares, lo cual era de esperarse dada la falta de mediciones mencionada. Por encima de 630 Hz comienza a verse una diferencia similar entre las curvas, con un valor promedio de 3.72 dB. Este comportamiento en frecuencias medias-altas se vuelve a observar en las mediciones de ruido de fondo (Figura 4).

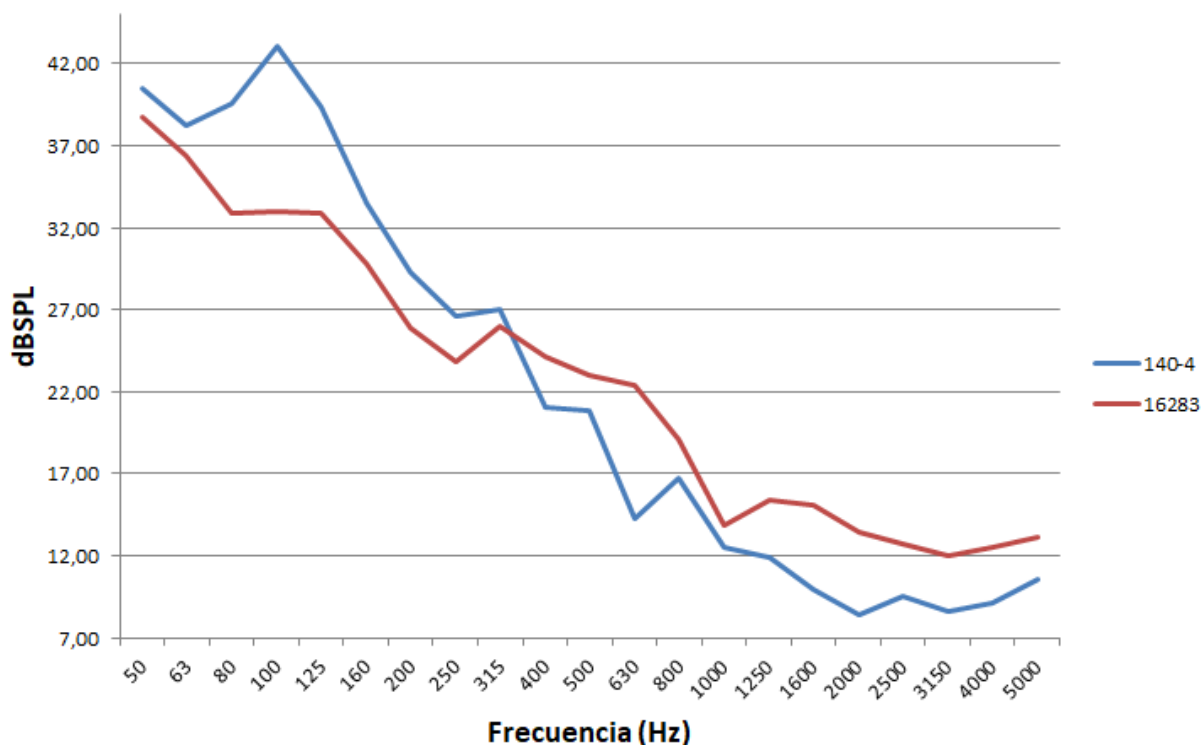


Figura 4: Niveles de ruido de fondo medidos en sala receptora.

2.3. Conclusiones

En general, la curva medida a través de escaneos manuales mostró valores mayores que la medida con posiciones fijas de micrófono, para los dos recintos. Las bandas extendidas de baja frecuencia (50, 63, y 80 Hz) mostraron grandes diferencias para todas las mediciones de SPL, de hasta 4.20 dB en sala emisora y 3.82 dB en sala receptora. Esto posiblemente se deba a la falta de mediciones (se midió para dos posiciones de fuente en lugar de tres), por lo cual los resultados obtenidos en estas bandas se ven comprometidos. Si no se toman en cuenta estas bandas, se infiere que las diferencias obtenidas en los niveles de SPL de la sala emisora poseen poca influencia en las diferencias observadas en los valores finales de R' .

Para la sala receptora, en frecuencias por encima de 630 Hz hay una diferencia promedio de 3.72 dB entre los valores obtenidos con el método de escaneo manual en relación a los obtenidos utilizando posiciones fijas de micrófono. Esto indica fuertemente que las diferencias en las curvas de R' se deben principalmente a la diferencia en las curvas de SPL obtenidas en la sala receptora. Como en esta situación en particular la sala receptora poseía cierto tratamiento acústico con el fin de disminuir tanto el tiempo de reverberación como el ruido de fondo dentro de la misma, se hipotetiza que el incremento en los niveles medidos a través del escaneo manual se debe a la influencia misma del operador. Es decir, de la energía acústica que irradia una persona que está moviéndose de manera constante (ruido de ropa, pasos, respiración, etcétera). No obstante, si esto fuera cierto, entonces el aporte energético del operador resultó ser mucho mayor al medir con la fuente irradiando que al medir ruido de fondo, lo cual implica un descuido por parte del mismo (es decir, tal vez realizó los movimientos de forma más cuidadosa al medir ruido de fondo que al medir el nivel con la fuente irradiando).

Como conclusión, puede decirse que los dos métodos brindan curvas de aislamiento con comportamientos similares. No obstante, al medir en recintos receptores en donde el piso de ruido es relativamente bajo y hay mucho aislamiento, es recomendable utilizar posiciones fijas de micrófono, ya que de esa forma se evita la influencia de la persona que representaría una fuente extra dentro del recinto a medir.

3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

3.1. Normativa y equipos utilizados

El análisis de vibraciones de la sala se llevó a cabo a partir de lo establecido por las siguientes normativas:

- **UNE-EN ISO 140-3:1995.** *“Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción. Anexo D: Medida de las transmisiones indirectas”.*
- **UNE-EN ISO 140-3:1995.** *“Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción. Anexo E: Medida del factor de pérdidas total”.*

Las herramientas utilizadas fueron las siguientes:

- Sonómetros/Vibrómetros Svantek SVAN 959. Números de serie 14772, 14768, 14766, 14767, 14771.
- Acelerómetros Dytran 3233A. Números de serie 467, 454, 453, 451, 429.

3.2. Medición de Flancos: Procedimiento

Primero, se llevó a cabo la calibración de los equipos de medición. La misma se hizo por sensibilidad, utilizando los valores dados por el fabricante que se ven en la tabla 6.

Nº vibrómetro	Nº serie acelerómetro	Sensibilidad
1	467	1049.7
2	454	1034.4
3	453	1037.8
4	451	1041.0
5	429	1023.9

Tabla 6: Sensibilidades de referencia de los acelerómetros.

Luego, se realizaron mediciones de vibraciones tanto en el paramento divisorio como en las dos paredes laterales.

Para ello, se utilizó una fuente omnidireccional del tipo dodecaedro en la sala emisora para excitar la pared divisoria y los flancos de la sala receptora. Se distribuyó la posición de los acelerómetros de forma que se pudieran obtener mediciones acerca de distintos materiales y elementos constructivos. No pudieron realizarse mediciones en el piso ya que el mismo se encontraba cubierto de alfombra. La pared divisoria tiene una puerta de madera con visor ventana de doble vidrio. Se dispuso un acelerómetro en la puerta tanto como en la superficie de vidrio. En adición a estos dos acelerómetros, se colocaron tres por paramento a analizar. Las coordenadas exactas de las posiciones de los acelerómetros tomadas con medidor láser se muestran en la Tabla 7, asociada a las figuras 5 y 6.

POSICIONES	X	Y	Z
VIBROMETROS	Pared divisoria (Laboratorio)		
FV1	1.71	2.88	1.30
FV2	3.04	2.88	1.16
FV3	2.17	2.88	0.89
FV4	2.78	2.88	1.64
FV5	3.54	2.88	0.40
VIBROMETROS	Pared lateral izquierda (Laboratorio)		
IV2	4.55	1.26	1.31
IV4	4.55	0.65	1.90
IV5	4.55	2.30	1.26
VIBROMETROS	Pared lateral derecha (Laboratorio)		
DV1	0.00	0.89	0.94
DV3	0.00	2.43	1.27
DV4	0.00	1.60	1.28

Tabla 7: Coordenadas de posiciones de acelerómetros en recinto receptor en metros

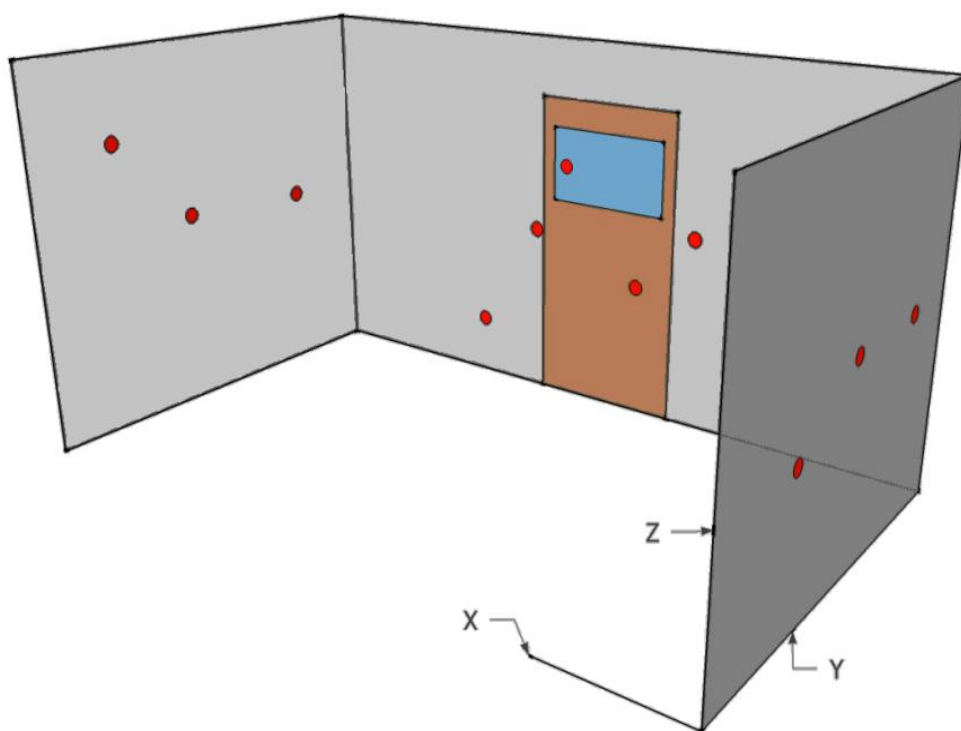


Figura 5: Modelo 3D de los paramentos analizados y las posiciones de acelerómetros.

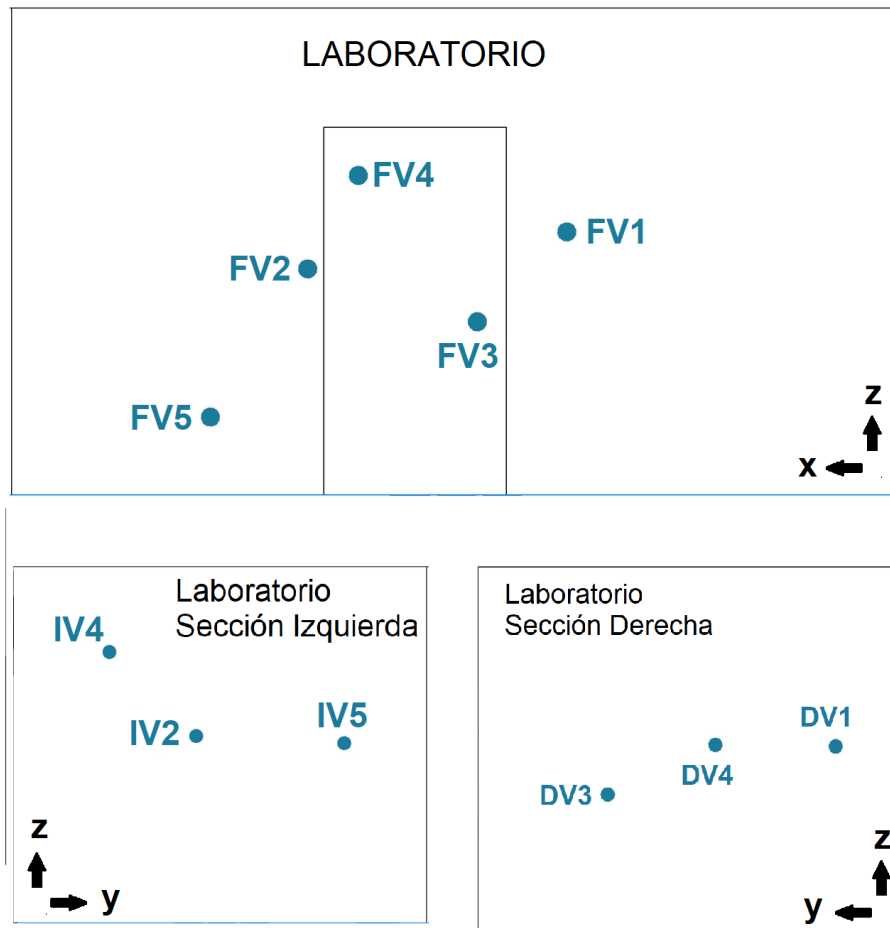


Figura 6: Medición de Flancos: ubicaciones de acelerómetros en recinto receptor

Las ubicaciones de los acelerómetros en las paredes laterales intentó ser lo más homogénea posible para conseguir un valor asociado a la misma a partir de 3 mediciones por pared. Los espacios de posicionamiento estuvieron limitados por el material absorbente, dado que el mismo se encontraba pegado a la mayor parte de la superficie del recinto. Se encontraron puntos en donde el mismo podía ser retirado de forma no destructiva. A pesar de ello, se intentó tomar puntos que no fueran simétricos en ambos planos para evitar modos de resonancia de la pared.

Para la medición propiamente dicha, se utilizó un tiempo de integración de 15 segundos, y se llevaron a cabo tres mediciones por posición.

3.3. Medición del factor de pérdidas total de pared: Procedimiento

Utilizando dos vibrómetros previamente calibrados, se los dispuso en la pared divisoria de la sala emisora con el fin de hallar el tiempo de reverberación de la pared. Esta medición se realizó del lado de la sala emisora ya que era no se podía hacer en la sala receptora debido a que el material absorbente impediría excitar con un impulso la pared. El impulso utilizado fue una serie de 4 golpes separados por un intervalo de medio segundo para cada una de las 3 posiciones de golpes delimitadas. Estas posiciones fueron escogidas considerando distribución homogénea de la pared, a distintas alturas y ambos lados de la puerta. Los acelerómetros se ubican separados de los puntos de golpe, cercanos al enmarcado de la puerta, nuevamente a diferentes alturas y ambos lados de la puerta. Las posiciones de acelerómetro se muestran en la Figura 6 asociada a la Tabla 8.

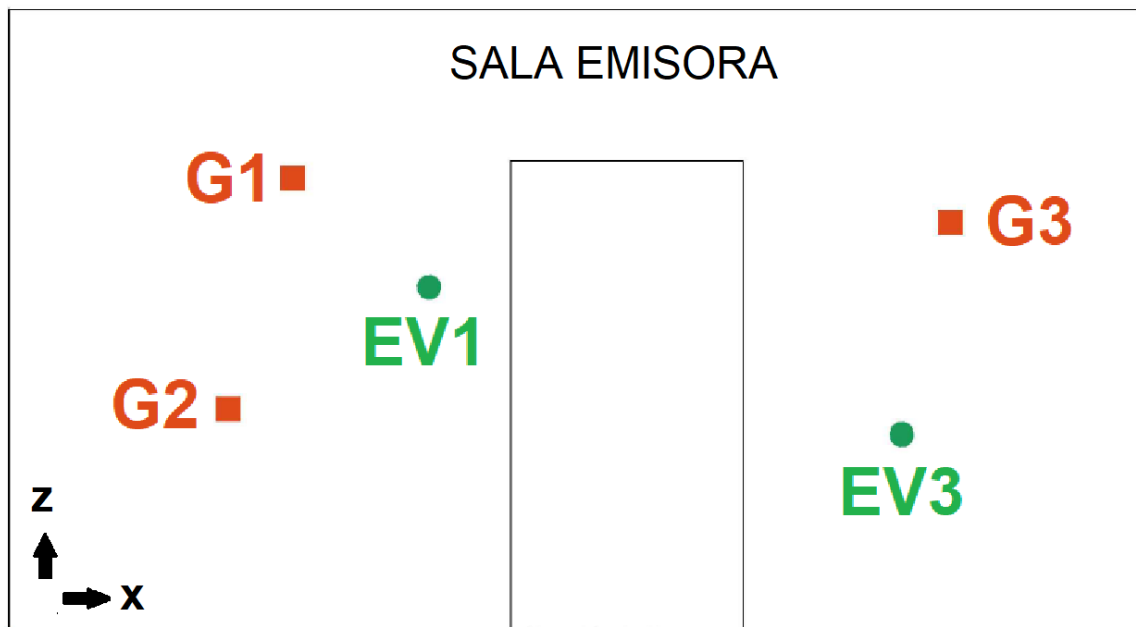


Figura 6: Medición de TR: ubicaciones de acelerómetros en recinto emisor

POSICIONES	X	Y	Z
GOLPES	Pared divisoria (Sala Emisora)		
G1	1.14	0.00	1.87
G2	0.88	0.00	0.94
G3	3.79	0.00	1.69
VIBROMETROS			
EV1	1.70	0.00	1.38
EV3	3.04	2.88	1.16

Tabla 8: Coordenadas de posiciones de acelerómetros en recinto emisor en metros

3.4. Medición de Flancos: Resultados

Una vez obtenidas las mediciones con vibrómetros para cada flanco, se realiza un promedio para comparar los resultados promediados de la pared divisoria con los de los flancos. En la Figura 7a y 7b se muestran los resultados para distintas velocidades de referencia según la norma, 1 nm/s y 50 nm/s respectivamente. Se observa que ambas paredes presentan mayor velocidad de vibración en bajas frecuencias, disminuyendo con el logaritmo de la frecuencia de forma lineal. Se comprueba que el nivel de velocidad de vibración superficial es mayor en la pared divisoria que los flancos laterales. La diferencia es menor en bajas frecuencias, incrementándose a partir de los 200 Hz, llegando a ser de hasta 20 dB para altas frecuencias. Existe un máximo local en la vibración superficial de la pared divisoria para los 500 Hz y 2500 Hz. Las pérdidas por frecuencia en 100 Hz, 500 Hz y 2500 Hz pueden estar asociadas a las frecuencias críticas del sistema de pared divisoria.

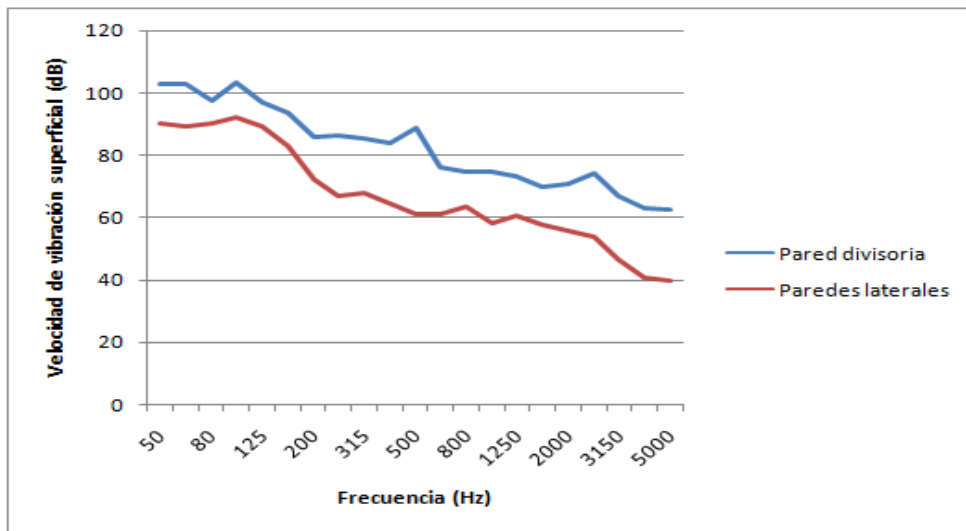


Figura 7a: Nivel de velocidad de vibración superficial L_v de la pared divisoria, referencia $v_0 = 10^{-9}$ m/s.

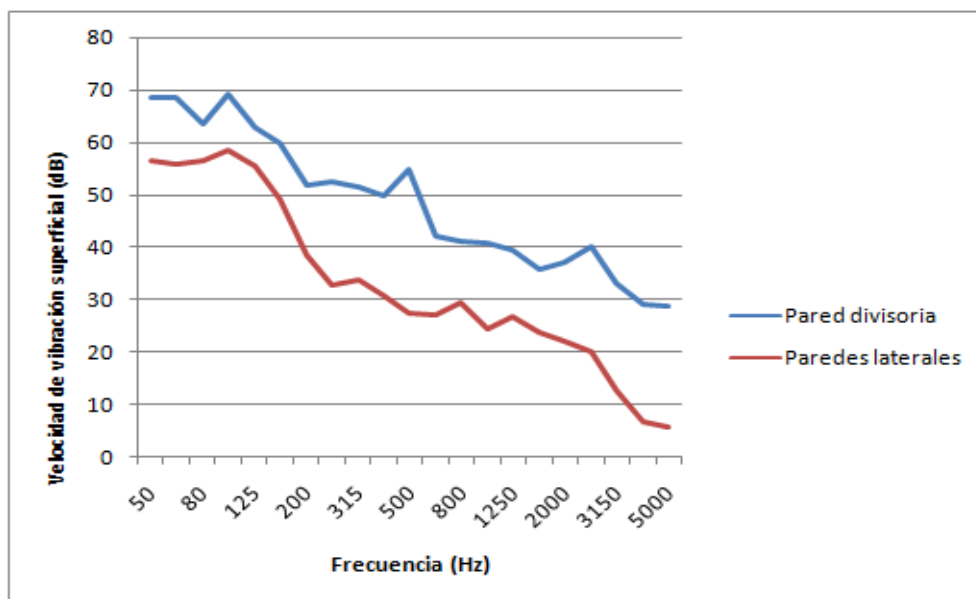


Figura 7b: Nivel de velocidad de vibración superficial de la pared divisoria, referencia $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Buscando analizar la diferencia entre la transmisión por flancos y la pared divisoria, se grafican las curvas de índice de reducción sonora en la Figura 8. Se observa que el índice de reducción sonora aparente del sistema total está totalmente gobernado por la reducción asociada a la pared divisoria, ya que es menor en todos los puntos a la reducción asociada a los flancos.

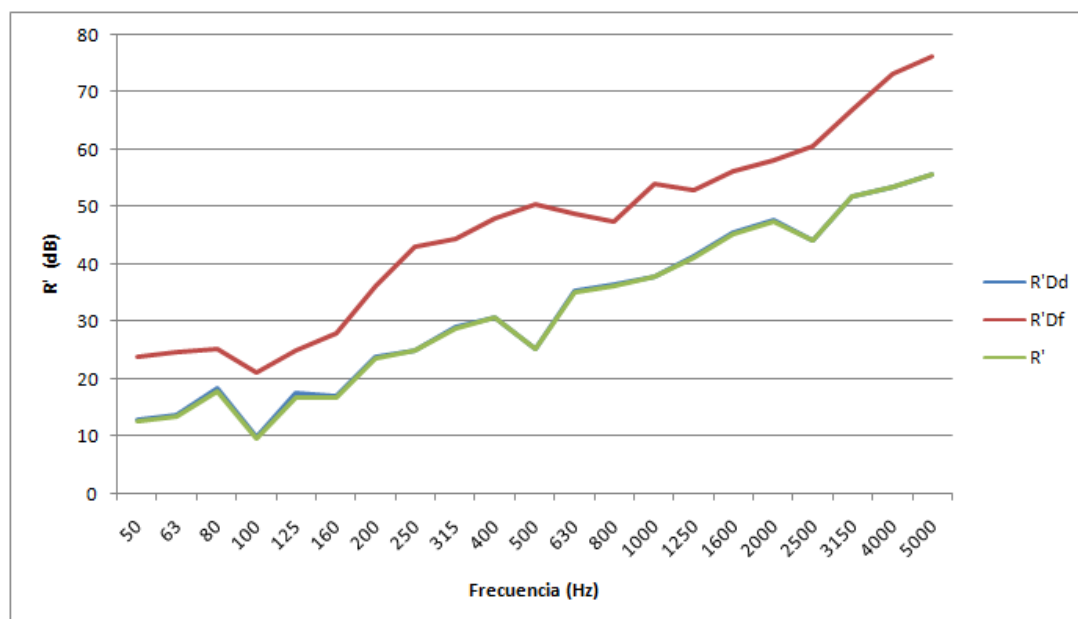


Figura 8: Índice de reducción sonora aparente de la pared divisoria (azul), de los flancos (rojo), total (verde).

Se ven nuevamente los mínimos locales en reducción para las frecuencias de 100 Hz, 500 Hz y 2500 Hz. Se puede observar que la curva de reducción asociada a las pérdidas por flancos también presenta un mínimo local para 100 Hz, lo que sugiere que ésta es la frecuencia crítica asociada al material constructivo de la pared. Por otra parte, los flancos no presentan los mínimos locales en 500 Hz ni en 2500 Hz; dando a entender que éstos están asociados al sistema puerta-vidrio.

Para averiguar a qué partes constructivas corresponden las frecuencias críticas se realiza una comparación entre los índices de reducción sonora aparente de las mediciones con acelerómetros ubicados en la pared divisoria para la puerta, la ventana y la pared propiamente dicha. En la Figura 9 se muestra que la frecuencia crítica de 500 Hz está asociada a la puerta solamente, mientras que la de 2500 Hz está asociado al sistema puerta-ventana, ya que ambas curvas presentan mínimos locales en dicha frecuencia, sugiriendo que el sistema se encuentra en resonancia. Esto se debe a que la ventana se encuentra asociada a la puerta físicamente. Es lógico asociar el mínimo local en 2500 Hz con la frecuencia crítica de la ventana debido a que es un rango esperable para un vidrio de este espesor, esto fue comprobado realizando un cálculo teórico de la frecuencia crítica del material aproximándolo a 1 cm de espesor mediante un software desarrollado en matlab. Debe tenerse cuidado al hacer este tipo de estimaciones, ya que se trata de un vidrio doble con cámara de aire que además presenta una frecuencia de cavidad asociada. Cabe notar que la frecuencia de cavidad para una distancia entre elementos estimada en 1 cm es teóricamente de 17 KHz, y por sobre ello, es un rango de frecuencias difícil de obtener correctamente en una medición utilizando acelerómetros que fueron sujetos con cinta de papel. Estas frecuencias se encuentran fuera del rango analizado en este trabajo.

Observando los resultados obtenidos en la pared divisoria se concluye que es problemático tomar un valor representativo de la pared divisoria, teniendo elementos constructivos tan diversos. Un mayor número de posiciones de acelerómetros habría ayudado a conseguir resultados más consistentes en el caso de la pared divisoria.

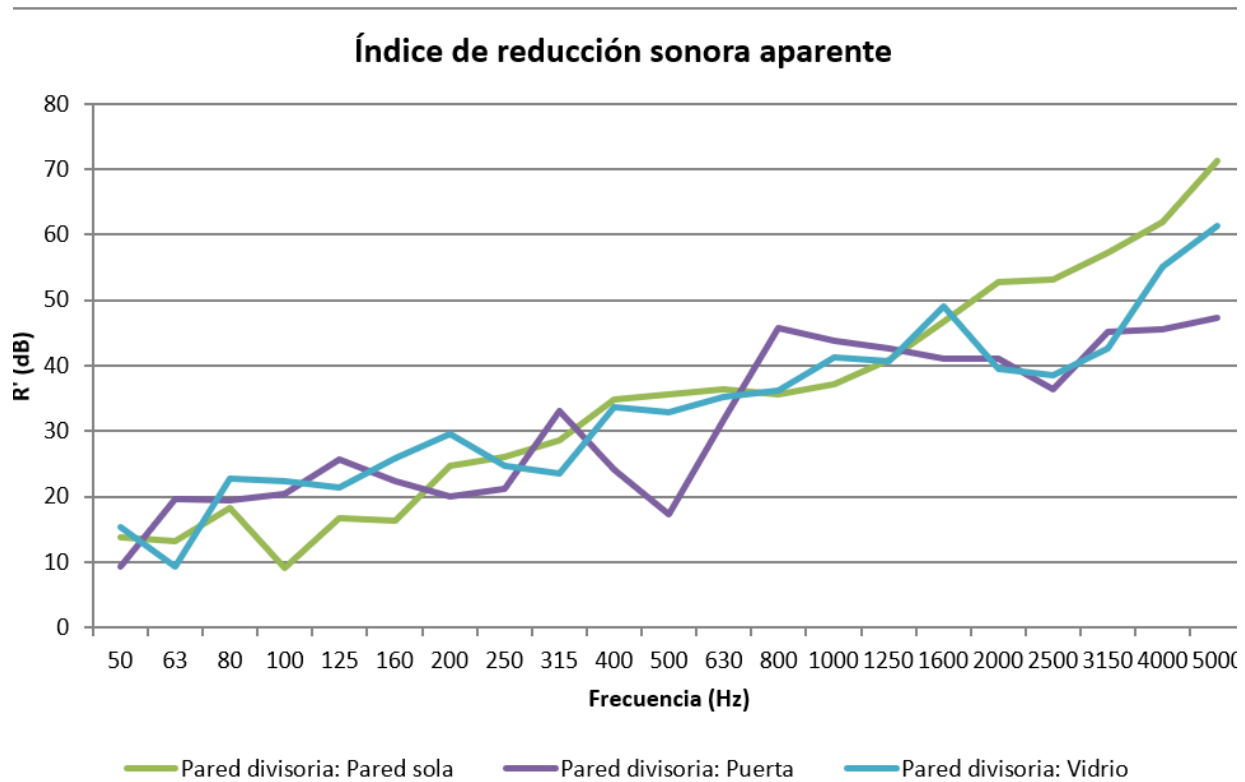


Figura 9: Índice de reducción sonora aparente de cada elemento de la pared divisoria: pared sola, puerta, vidrio.

La comparación entre curvas muestra que la conexión mecánica crítica del sistema de pared divisoria se encuentra en el conjunto puerta-vidrio. En particular, la puerta, presentando una frecuencia crítica con pérdidas considerables en 500 Hz. Una posible causa es el espesor reducido de la misma en comparación al de la pared. En cuanto al vidrio, si bien tiene menor espesor, su masa superficial es mayor, resultando en un índice de reducción sonora significativo en relación a su superficie.

Finalmente, la figura 10 muestra una comparación entre el índice de reducción sonora aparente obtenido a través de la medición de vibraciones con el obtenido a través de mediciones de nivel de presión sonora.

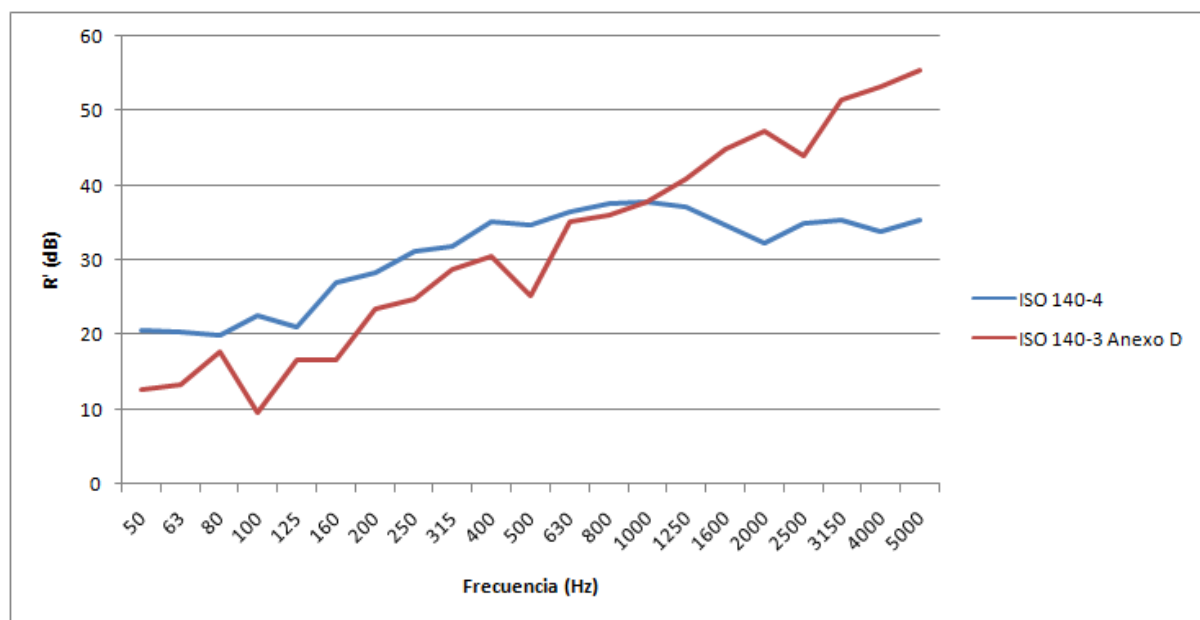


Figura 10: Índice de reducción sonora aparente según los métodos de ruido aéreo y de transmisión por flancos.

3.5. Medición del factor de pérdidas total de pared: Resultados

Haciendo un análisis del factor de pérdidas total de la pared divisoria se observa un máximo absoluto en 100 Hz y un decaimiento lineal con el logaritmo de la frecuencia hasta 1000 Hz, en donde se vuelve asintótico hacia la nulidad.

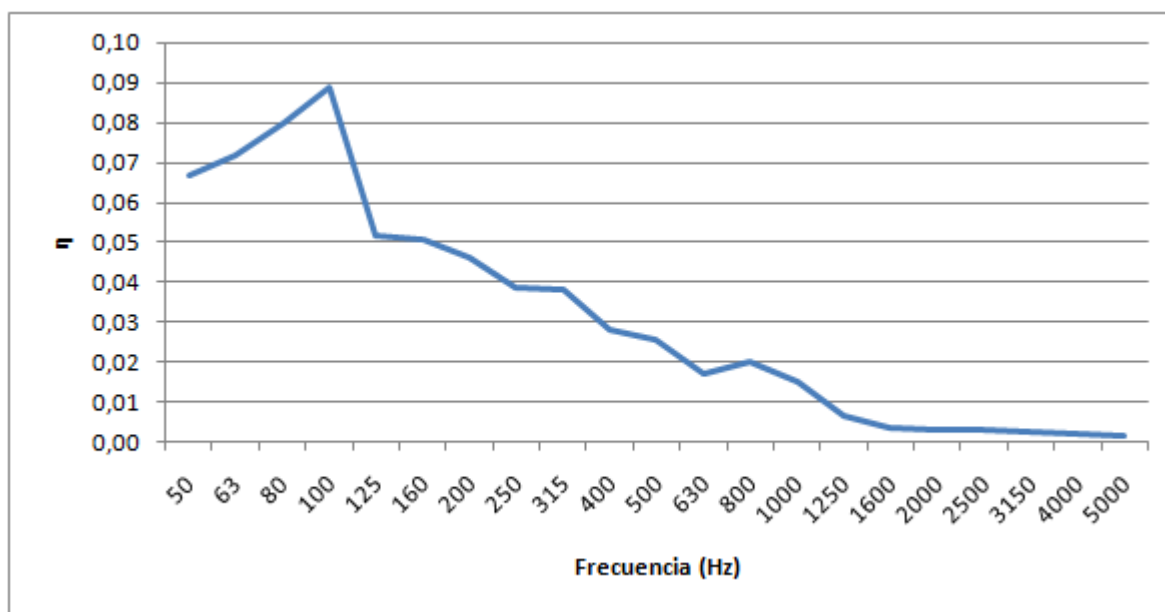


Figura 12: Factor de pérdidas total de la pared divisoria.

3.6. Conclusiones

A partir del análisis propuesto, se llegó a las siguientes conclusiones:

- A través del análisis de las transmisiones por flancos, se determinó que la mayor parte de la energía vibratoria es irradiada por la pared divisoria. Es decir, el índice de reducción sonora aparente obtenido es principalmente el de la pared divisoria. El mismo posee caídas relativas en las bandas de 100, 500, y 2500 Hz.
- A partir de esto último, se determinó que cada una de estas caídas es causada por la frecuencia de menor aislamiento de cada uno de los tres elementos constructivos que conforman el paramento divisorio: la caída en 100 Hz se debe a la pared, mientras que las caídas en 500 y 2500 Hz son causadas por la puerta y por el vidrio, respectivamente.
- Al comparar el índice de reducción sonora aparente obtenido a través de vibraciones con el obtenido a través de mediciones de nivel de presión sonora, se ven diferencias principalmente por encima de los 1000 Hz. Esto puede haberse debido a un deficiente fijado de los acelerómetros a los paramentos.
- El cálculo del factor de pérdidas de la pared divisoria muestra resultados congruentes con lo visto anteriormente, ya que el mismo posee un pico en 100 Hz, determinado por la frecuencia de coincidencia de la pared.

4. REFERENCIAS

UNE-EN ISO 140-4:1999. *“Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición ‘in situ’ del aislamiento al ruido aéreo entre locales.”*

UNE-EN ISO 16283:2015. *“Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.”*

UNE-EN ISO 717-1:2013. *“Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.”*

UNE-EN ISO 354-1:2004. *“Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.”*

UNE-EN ISO 140-3:1995. *“Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción.”*