

Reducción de volumen de sonido y resonador de Helmholtz

¿Cuál es el efecto en el tiempo de reverberación dentro de una sala al emplear diferentes resonadores de Helmholtz?

Física

Número de palabras: 3544

Índice

1	Introducción	1
1.1	El ruido visto en frecuencias	2
1.2	Pregunta y modelo de solución	2
2	Breve introducción a la Resonancia	3
2.1	Resonancia Mecánica	3
2.2	Resonancia Acústica	4
3	Resonadores de Helmholtz	5
3.1	¿Qué son?	5
3.2	Representación matemática	6
3.3	Panel resonador	8
4	Tiempo de reverberación	11
4.1	T60, T30, T20	11
4.2	EDT	11
5	Modelo experimental	12
5.1	Factores influyentes	12
5.1.1	Limitación del resonador	12
5.1.2	Determinación de frecuencias para muestreo	12
5.1.3	Características físicas del resonador	13
5.2	Estructura del resonador	13
5.2.1	Características del panel resonador	14
5.2.2	Aplicación de la fórmula	15
5.3	Gráfico modelo experimental	16

5.2.2 Bosquejo paneles resonadores	17
5.2.3 Paneles resonadores elaborados.....	17
5.4 Instrumentos de medición.....	18
5.4.1 Software	18
6 Muestreo y gráficos.....	19
6.1 Resonancia alimentada por frecuencia correspondiente	19
6.2 Resonancia alimentada por ruido rosa	20
6.3 Tiempo de reverberación sala sin resonadores	22
7 Conclusiones	24
8 Bibliografía	25

1 Introducción

Cada vez la sociedad está más expuesta a mayores niveles de ruido en el quehacer diario. Este fenómeno ocasiona problemas de convivencia y de salud en las personas. Los posibles resultados de la afectación por ruido es el aumento de disconformidad, rechazo, segregación y stress. En casos de ambientes educativos, el ruido causa distracción, afectación auditiva y bajo nivel de aprendizaje. En casos de adultos mayores, el impacto es aún mayor causando trastornos de comportamiento y afectación en el sueño.

Frente a esta creciente amenaza para la convivencia humana, se han implementado mecanismos aplicados a todos los ámbitos, empezando por soluciones habitacionales y de oficinas libre de ruido, reglas urbanas de regulación de ruido, barreras naturales de cancelación de ruido hasta soluciones simples como aislamiento de zonas ruidosas por medio de uso de auriculares que cada vez se ve con más frecuencia en grupos de personas jóvenes.

Por su lado, científicos han buscado entre muchas opciones de investigación, una relacionada con la reducción de sonido que permita armonizar un ambiente y del cual esta investigación va a tratar.

Entre las complejidades de vivir en comunidad, existe una que es muy recurrente e incluso a menudo se utiliza para simbolizar una convivencia negativa con el prójimo o vecino. Este es el problema de un “volumen muy alto” en la emisión de ruido, las razones posibles son muchas, desde el ruido ocasionado por una celebración en el lugar cercano hasta un ruido generado por un gran sistema de ventilación indispensable para muchas grandes edificaciones.

No cabe duda de que se ha realizado proyectos con la finalidad de solventar estos problemas, sin embargo, las soluciones a menudo presentan resultados parciales que no cubren las expectativas. La noción de una reducción de sonido de gran magnitud o también conocida como cancelación de sonido es por lo tanto compleja ya que no se ha podido lograr de manera total en los escenarios descritos.

Una opción viable se basa en un conjunto de dispositivos y objetos reductores de sonido mediante una acción simultánea. Esta idea permite mejorar la eficacia debido a que cada dispositivo cumple su función de mejor manera en determinados rangos de frecuencia por separado.

1.1 El ruido visto en frecuencias

Las ondas de sonido de baja frecuencia que tienen mayor facilidad de traspasar una pared, desde una edificación a otra debido a su mayor longitud de onda, la cual permite transmitirse a través de objetos planos sin mucha dificultad, en contraste, las ondas de alta frecuencias no tienen la misma capacidad debido a que su longitud de onda es mucho menor.

Debido a esto el enfoque de esta investigación se centra el rango de bajas frecuencias que se presentan en dispositivos emisores como parlantes subwoofers y en general en el ruido de fondo de una ciudad.

Esta investigación ofrece el conocimiento aplicable al diseño de dispositivos de cancelación de ruido en baja frecuencia. Idealmente estos dispositivos se deberían complementar con otros que cumplan una función similar, pero para frecuencias mayores y de esta forma lograr mejor cobertura del ruido en diferentes frecuencias.

1.2 Pregunta y modelo de solución

¿Cuál es el efecto en los decibelios de determinados rangos de frecuencia de sonido al emplear diferentes resonadores de Helmholtz?

Para evaluar y responder la pregunta se procederá de forma experimental con la construcción de una matriz de resonadores de Helmholtz. Para determinar la forma que deben tener los resonadores y la matriz se tomarán en cuenta las características variables de estos descritas en la teoría, analizado a la vez este factor con las frecuencias escogidas.

Posterior se realizarán las evaluaciones físicas mediante el uso de micrófonos sonido que permitirán realizar grabaciones que luego se analizarán con la ayuda de Software. La información proporcionada permitirá determinar el efecto final que tuvo la matriz elaborada en las frecuencias inherentes a un rango previo escogido.

2 Breve introducción a la Resonancia

2.1 Resonancia Mecánica

La mejor manera de comprender el efecto de la resonancia es mediante la analogía del columpio.

Al ser aplicable a los mismos conceptos físicos, se entiende que también tiene una longitud de cuerda, masa, amplitud, periodo y por ende frecuencia. Al comenzar el movimiento, se busca aumentar la amplitud, para eso se debe dar impulso inicial a la masa, luego se debe dar impulsos cada vez que no haya energía cinética, pero solamente potencial. De lo contrario, si se empujase cuando hay energía cinética, el impulso dado no aumentaría la energía del sistema en su totalidad, en incluso podría estarlo frenando.

La frecuencia con la que se deben dar los impulsos para que cada uno de ellos aumente de manera total la energía del sistema, es la frecuencia natural de columpio. El momento en el que ambas frecuencias coinciden, la energía total aumenta por cada impulso, sin pérdidas por cancelación debido a impulsos en dirección contraria al movimiento, a este efecto se lo conoce como resonancia.

La frecuencia natural del péndulo se encuentra mediante la siguiente fórmula, donde L es la longitud de cuerda y g la aceleración dada por la gravedad. (Olmo M, n.d.)

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

Ecuación 1 Frecuencia natural péndulo. (Medina)

La resonancia aplica a todos los fenómenos que se relacionen con ondas y oscilaciones, de ahí su clara importancia.

Otro ejemplo de resonancia mecánica es el que sucede cuando se emplea un resorte y una masa, en este caso también se puede dar el movimiento armónico simple. La resonancia sucede cuando en cada extremo de la amplitud, cuando no hay movimiento, se da el impulso y de esta manera se aumenta la energía cinética del sistema. Al igual que en el caso previo y todos los casos,

la frecuencia con la que se deben suministrar estos impulsos será la frecuencia natural del resorte con la masa. (Olmo M, n.d.)

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ecuación 2 Frecuencia natural muelle. (Medina)

La frecuencia natural es proporcional a la constante del resorte e inversa a la masa sobre el resorte.

2.2 Resonancia Acústica

La resonancia acústica no difiere en gran cantidad de las antes explicadas, puesto que también es un fenómeno mecánico. Para comprenderla se debe entender las equivalencias de los componentes del resonador acústico con un sistema mecánico. (Olmo M, n.d.) (Turrull)

El aire dentro volumen de la cavidad, al ser el que se comprime y luego se estira, pasa a ser el resorte del sistema. Mientras que el aire del volumen presente en la longitud de puerta abierta en analogía es la masa que se une al resorte. Las ondas de sonido, compresiones y descompresiones de aire, realizan el papel del agente externo que proporciona de ‘empujones’ y ‘halones’ a la masa de aire en la sección de la longitud de puerta abierta del resonador.

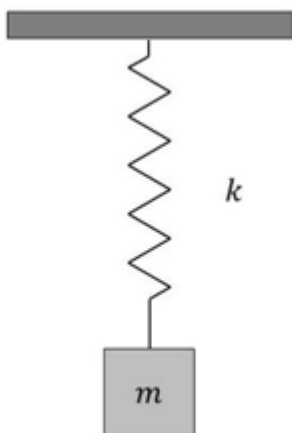


Ilustración 1. Muelle. (Mon Happy, 2017)

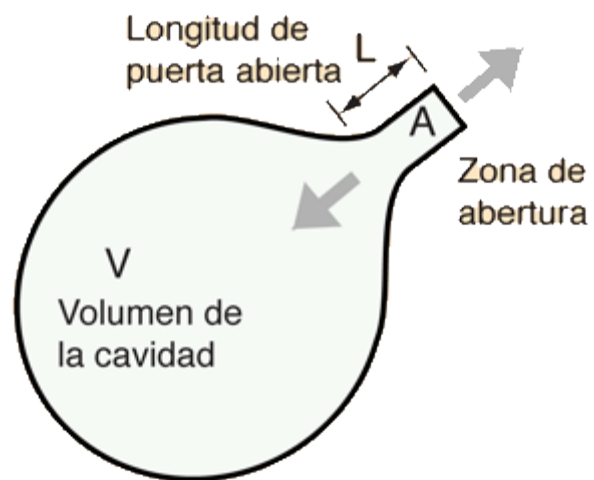


Ilustración 2. Partes del resonador, en resumen. (Nave, n.d.)

La frecuencia natural de un resonador se determina mediante la fórmula siguiente:

$$\omega = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL}}$$

Ecuación 3 Frecuencia natural resonador. (Nave, n.d.)

3 Resonadores de Helmholtz

3.1 ¿Qué son?

Herman Helmholtz aprovechó la sensibilidad de las vibraciones el aire para elaborar un resonador y apreciar estas vibraciones en forma de sonido. En sus investigaciones utilizó una esfera hueca de metal con dos aberturas como se muestran en la figura 1. El aire en la cavidad se moldea elásticamente cuando la masa de aire en el cuello reacciona con esta elasticidad y forma un sistema de resonancia como una masa colgada a un resorte lo hace en su movimiento periódico. Cambiando el volumen de la cavidad o la longitud del cuello, se cambia la frecuencia de resonancia. (Soufflé)

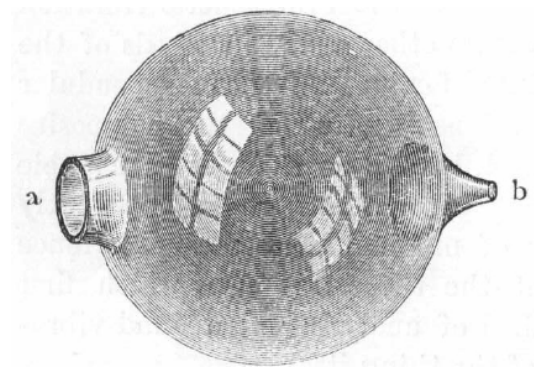


Figura 1 Resonador de Helmholtz. (Helmholts, 1875).

A partir de sus experimentos para el estudio de la resonancia en las cavidades, hoy en día se conocen las mismas como resonadores de Helmholtz. Una aplicación fue realizada en iglesias de Suecia y Dinamarca como se muestra en la Figura 2 en donde se usaron botellas de cerámica incrustadas en las paredes con el fin de reducir reverberación de baja frecuencia el cual es un problema común en iglesias. (Soufflé)

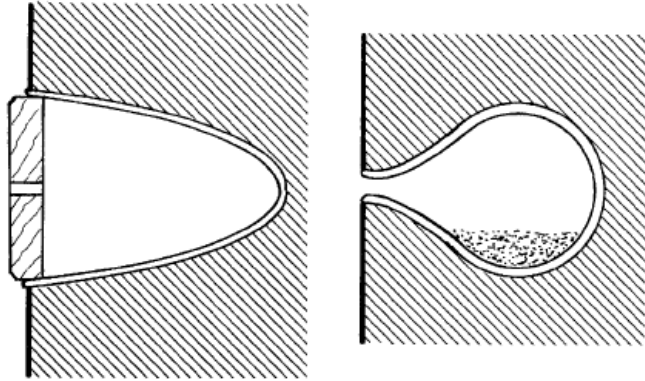


Figura 2 Envases incrustados en Iglesias medievales. (Brüel, 1951)

Esta aplicación se basa en un esquema en donde existe una cavidad de volumen (V), una sección transversal del cuello (S) y una longitud del cuello (L)

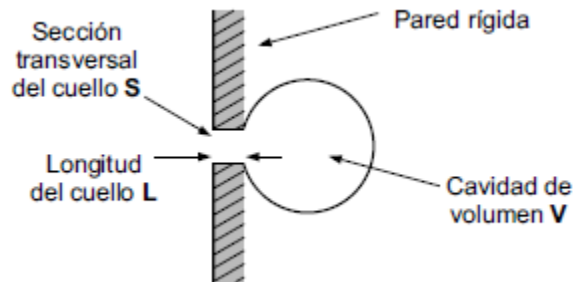


Figura 3 Esquema básico de un resonador montado en la pared. (Carrión, 1998)

3.2 Representación matemática

Se puede hacer una analogía con un muelle en movimiento armónico simple creando sonido. La frecuencia del sonido creado es igual a la de la vibración del aire la cual está determinada por la fórmula:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{(L + 1.7r)V}}$$

Ecuación 4 Frecuencia natural del resonador con corrección. (Fernández, Sánchez, & Gilberto, 2011)

En donde tenemos un factor de corrección igual al 1.7 veces el radio del cuello. En esta fórmula c es la velocidad del sonido y calculando en centímetros por segundo (34300 cm/s) tenemos :

$$f = 5480 \sqrt{\frac{s}{(L + 1.7r)V}}$$

Ecuación 5 Frecuencia natural resonador con valor en centímetros.

Esta frecuencia es válida con independencia de la forma del resonador, es decir, podría ser una botella, una caja o una sección vacía siempre que la geometría mantenga la relación $\frac{s}{LV}$.

En la figura 4 se tiene la evolución del coeficiente de absorción de un resonador de este tipo y se puede ver que se presenta una absorción muy elevada para una frecuencia baja específica.

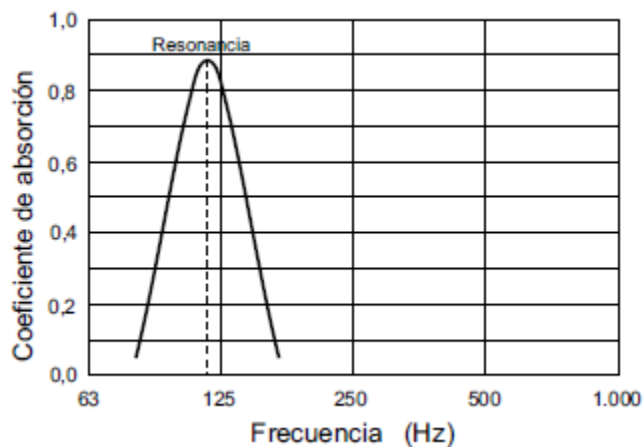


Figura 4 Coeficiente de absorción en un resonador de una cavidad. (Carrión, 1998)

Para lograr absorción de otras frecuencias, es necesario colocar en el cuello o la boca de la cavidad material absorbente como algodón o gasa y tenemos un resultado mostrado en la Figura 5

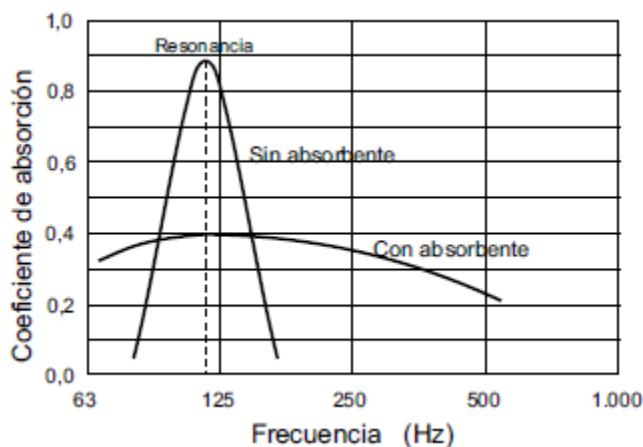


Figura 5 Coeficiente de absorción con absorbente. (Carrión, 1998)

3.3 Panel resonador

El sonido que afecta el resonador y no es absorbido es regociado en forma de difusión y es lo que se necesita en un estudio o cuarto de sonido para que la acústica sea óptima.

Sin embargo, tener un solo resonador no es práctico y se debe utilizar una agrupación de resonadores formando una cavidad múltiple en base a paneles perforados o ranurados de material no poroso y rígido de espesor D . El panel se coloca a una distancia “ d ” de la pared rígida con el fin de dejar la cavidad de aire como se muestra en la Figura 6.

Cuando una onda sonora incide en el panel, cada una de estas cavidades se convierte en un conjunto de resonadores simples de Helmholtz.

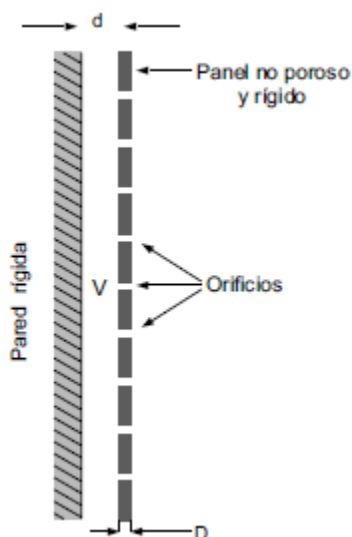


Figura 6 Resonador de cavidad múltiple. (Carrión, 1998)

Este sistema de absorción de sonido ha sido adoptado en la elaboración de paneles perforados y la disposición de las perforaciones, su diámetro y ancho del panel hacen que se tenga mayor o menor eficiencia de absorción.

En general, se desea que el diámetro de los orificios sea similar al grosor del panel con el fin de que las ecuaciones previamente descritas sigan siendo válidas, sin embargo, el porcentaje de perforación también debe ser considerado.

La fórmula de frecuencia es análoga por lo tanto al resonador simple:

$$f = 5480 \sqrt{\frac{S_o}{DV}}$$

Ecuación 6 Frecuencia natural de panel resonador. (Fernández, Sánchez, & Gilberto, 2011)

En donde S_o es la suma de las áreas de los orificios (cm^2), D el espesor del panel que coincide con el diámetro del orificio y V el volumen de la cavidad en cm^3

Considerando la distancia a la pared trasera de la caja “e”, la superficie del panel S_p y el porcentaje de perforación P_p , entonces la fórmula pasa a ser:

$$\text{Si: } V = S_p \times e \quad \text{y} \quad P_p = \frac{S_o}{S_p} \times 100$$

$$f = 5480 \sqrt{\frac{P_p}{De}}$$

Ecuación 7 Frecuencia natural de un panel resonador. (Fernández, Sánchez, & Gilberto, 2011)

El porcentaje de perforación p se puede definir en base a la disposición de los orificios:

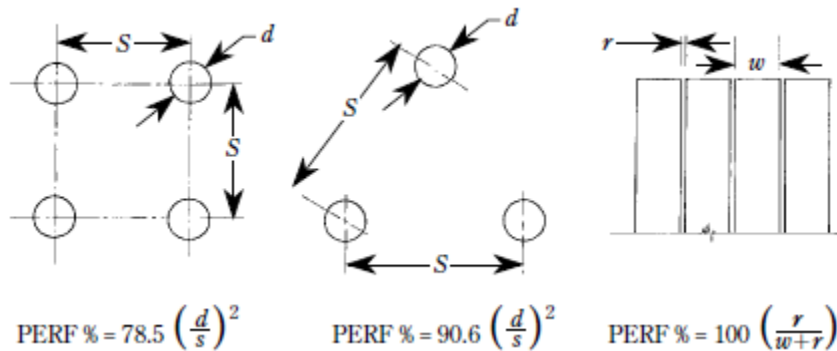
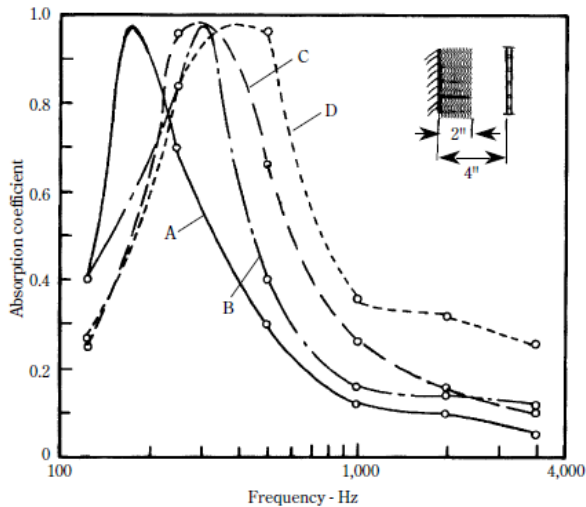


Figura 7 Porcentaje de perforación para resonadores Helmholtz. (Everest, 2001)

Cuando se utiliza tableros perforados, el número de orificios es muy grande y hace que el sistema solamente tenga resonancia para altas frecuencias. Para absorber las frecuencias bajas, los huecos pueden ser perforados a mano con un porcentaje de perforación más bajo. Por ejemplo, en la figura 8, se muestra el efecto de variar el área de perforaciones desde el 0.18% al 8.7%. La plancha es de 4 mm de espesor y perforada con huecos de 5 mm. La plancha tiene una separación de 10 cm de la pared:



Distancia entre orificios

A -> 2.5 cm

B -> 5 cm

C -> 10 cm

D -> 15 cm

Figura 8 Coeficiente de absorción vs frecuencia. (Everest, 2001)

Debido al acoplamiento entre los diferentes orificios, la curva de absorción de diferentes frecuencias es más amplia. El grado de absorción en función de la frecuencia aumenta al rellenar la cavidad con lana mineral o lana de vidrio. Por ejemplo, en la figura 9 se ha obtenido valores para un panel de cartón-yeso de 13 mm de espesor perforando un 18% y con una separación de 10 cm de la pared rígida:

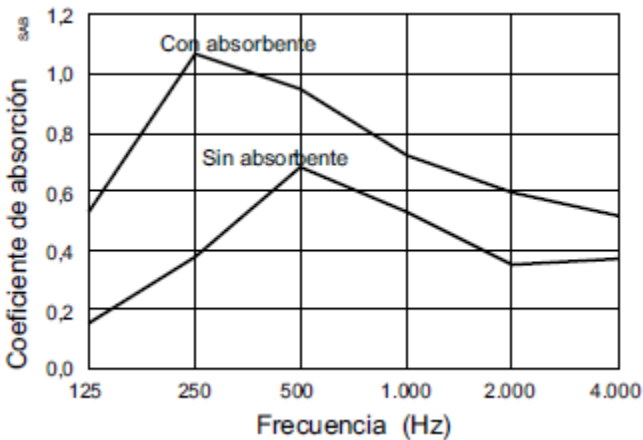


Figura 9 Absorción vs. Material absorbente. (Carrión, 1998)

En la práctica, la cavidad de resonancia se rellena con material absorbente y debe estar situado en el panel perforado. Si colocamos este material en la pared fija, la absorción es más selectiva como se muestra en la Figura 10.

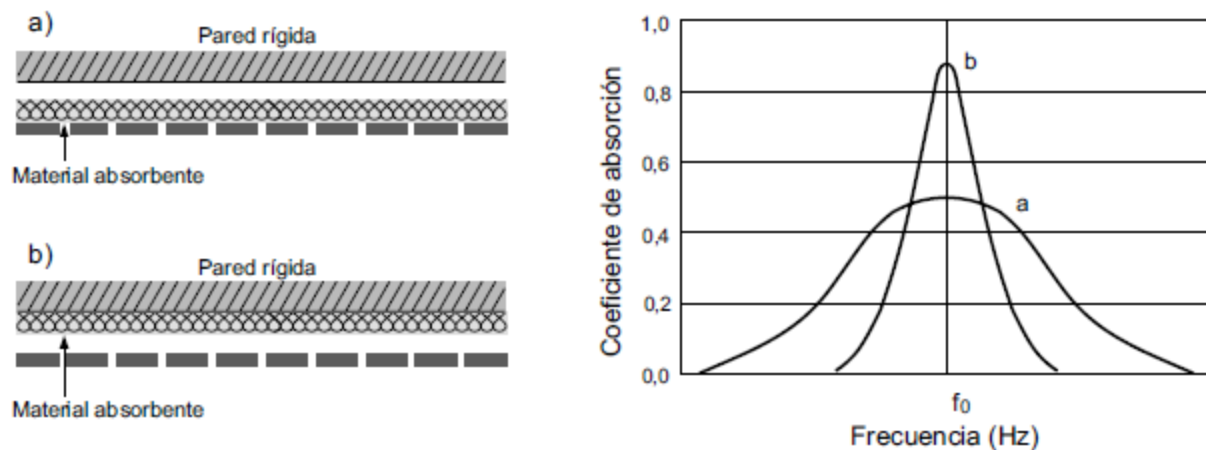


Figura 10 Disposición del material absorbente. (Carrión, 1998)

4 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación es la cantidad de segundos transcurridos hasta que cesa el sonido emitido por una fuente. Existen cuartos cuyo tiempo de reverberación es muy breve, a estos se les califica de “vivo”, al igual que existen unos con tiempo corto, y son denominados “muerto”.

Puesto que el tiempo de reverberación depende proporcionalmente de los decibelios emitidos al inicio, se determinaron medidas que referenciaran al tiempo de reverberación de manera independiente a la fuente: (Sau, 2015) (Olmo M, n.d.)

4.1 T60, T30, T20

Tiempo en segundos en el que se demora en decaer el sonido 60, 30, y 20 decibelios respectivamente. (Ecophon, n.d.)

4.2 EDT

Early Decay Time, es un parámetro relacionado con el tiempo de reverberación con la diferencia que en este parámetro se calcula en un tiempo más corto que en el T60, T30 y T20. Este brinda información de la claridad (clarity) dentro de la sala. (Ecophon, n.d.)

5 Modelo experimental

5.1 Factores influyentes

El diseño de la matriz de resonadores va de acuerdo con su complejidad que aumenta a la vez que se desean afectar frecuencias más altas. Para determinar las características de la forma que debe tener un resonador según la frecuencia, se debe partir de la formula de la resonancia antes mencionada. (Cox & D'Antonio, 2009)

5.1.1 Limitación del resonador

Debido a que la velocidad del sonido es de cierta manera constante, se toma en cuenta las demás variables. La frecuencia es proporcional al área de entrada de aire y es inversamente proporcional al volumen y a la longitud de entrada. Por esto se comprende que si se desea causar un efecto en frecuencias mas altas de sonido se deberá reducir el volumen al igual que el largo de la entrada o cuello, y aumentar el área de entrada. Debido a esto la complejidad de cancelar frecuencias altas, lo cual es un limitante al resonador de Helmholtz y muestra su efecto en la experimentación. (Cox & D'Antonio, 2009)

5.1.2 Determinación de frecuencias para muestreo

Se deben tomar en cuenta qué frecuencias se pretenden afectar en base a las que tienen mayor posibilidad de presentar mayor reverberación en habitaciones, puesto que la experimentación se realizará en un cuarto cerrado con la finalidad de que la energía acústica no se propague hacia los exteriores y que las mediciones a obtenerse de los decibelios sean más exactas.

Las frecuencias que presentan mayor reverberación son las que no son absorbidas por las paredes y mas bien tienden a reflejarse. La siguiente tablas muestra los coeficientes de absorción de determinadas constituciones material de paredes de un recinto.

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hormigón macizo	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Bloques de hormigón pintados	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Ladrillo revestido con yeso	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04

Tabla 1 Coeficientes de absorción de materiales comunes en función de la frecuencia (Carrión, 1998)

Para determinar el coeficiente de absorción de un material en función de la frecuencia se emplea la siguiente fórmula:

$$\alpha = \left(\frac{2\rho_0 c}{\omega M} \right)^2$$

ρ_0 = densidad del aire $\omega = 2\pi f$ f = frecuencia (en Hz)
 M = masa por unidad de superficie

Ecuación 8 Cálculo coeficiente absorción (Carrión, 1998)

Puesto que el coeficiente de absorción es inversamente proporcional a la frecuencia se buscaría realizar el muestreo en frecuencias altas, sin embargo, estas pasan a ser reducidas a una sección por el limitante factor que el resonador realiza mejor la absorción de ondas de frecuencias bajas; previo explicado. Los resonadores de Helmholtz desempeñan mejor la absorción acústica bajo los 500 Hz, por ende, se plantea la preferencia de muestrear con cavidades que capturen entre 100 Hz a 500 Hz. También cabe recalcar que el margen de error del micrófono respecto a las frecuencias menores a 100 Hz es mayor, por ende, el límite.

5.1.3 Características físicas del resonador

El factor de rigidez de las paredes del resonador también se debe tomar en cuenta puesto que esto permitirá que el rango de frecuencias afectadas por el resonador sea más específico y de esta manera poder analizar con mayor precisión los datos. Por ende, se planteará emplear material rígido; madera MDF.

La porosidad microscópica del material también tiene consecuencias físicas como el flujo diferenciado del aire y la superficie de contacto que causan un error en la precisión de las frecuencias afectadas, por ende, la superficie del material es lisa. (Fernández, Sánchez, & Gilberto, 2011)

5.2 Estructura del resonador

El efecto de la resonancia por cavidad aumenta de manera proporcional a las cavidades que sean empleadas, por lo tanto, se plantea realizar la experimentación con mayor cantidad de resonadores posibles. Contando con el hecho que elaborar varios resonadores independientes es

un proceso largo, se decide realizar el modelo mas bien a base de un panel resonador cuyos efectos son iguales como previo explicado.

5.2.1 Características del panel resonador

Se elaboran dos paneles resonadores que tienen su respectiva frecuencia absorbente.

1. 61.3 Hz: Permite evaluar la Ecuación 7 Calculo coeficiente absorción y se encuentra en el rango de buena operación de un micrófono.
2. 200 Hz: Valor intermedio que permite evaluar el teorizado aumento del efecto de un resonador en estas frecuencias.

A partir de lo previo, se deben definir las medidas del panel resonador para que efectúe sobre estas frecuencias.

Con la finalidad de poder realizar comparaciones de las medidas tomadas de los efectos de los paneles, se plantea que estos tengan el mismo volumen.

En base a la Ecuación 6 Frecuencia natural de un panel resonador, se despeja la fórmula para obtener una que indique la cantidad de huecos que debe tener cada panel dependiendo de valores predeterminados: Volumen, radio de orificios, espesor de la pared (Donde se sitúan los orificios) y frecuencias que se buscan afectar. Obteniendo la siguiente:

$$n(f) = \frac{f^2 \times (e + 1.7r)XYZ}{5480^2 \times \pi r^2}$$

Ecuación 9 número de orificios (Lascano, 2019)

Donde:

- Respecto a las perforaciones:
 1. n: cantidad.
 2. r: radio. 1 cm
- Respecto al panel:
 3. Z: profundidad. 20 cm
 4. X: ancho. 90 cm
 5. Y: altura. 90 cm
- Respecto al espesor del material MDF:

6. e : espesor. 1.5 cm

- Respecto a la frecuencia a afectar:

7. f : frecuencia.

5.2.2 Aplicación de la fórmula

1	
frecuencia (Hz)	61.3
Constante	5480
%perforaciones	0.78
D"	3.1
Espesor (cm)	1.5
Radio (cm)	1
#perforaciones	20.0
Eje X (cm)	90.0
Eje Y (cm)	90.0
Eje Z (cm)	20
Área Total (cm ²)	8100
Área perforada (cm ²)	62.84

2	
frecuencia (Hz)	82.2
Constante	5480
%perforaciones	1.40
D"	3.1
Espesor (cm)	1.5
Radio (cm)	1
#perforaciones	36.0
Eje X (cm)	90.0
Eje Y (cm)	90.0
Eje Z (cm)	20
Área Total (cm ²)	8100
Área perforada (cm ²)	113.00

Tabla 2 Especificaciones numéricas paneles resonadores (Lascano, 2019)

5.3 Gráfico modelo experimental

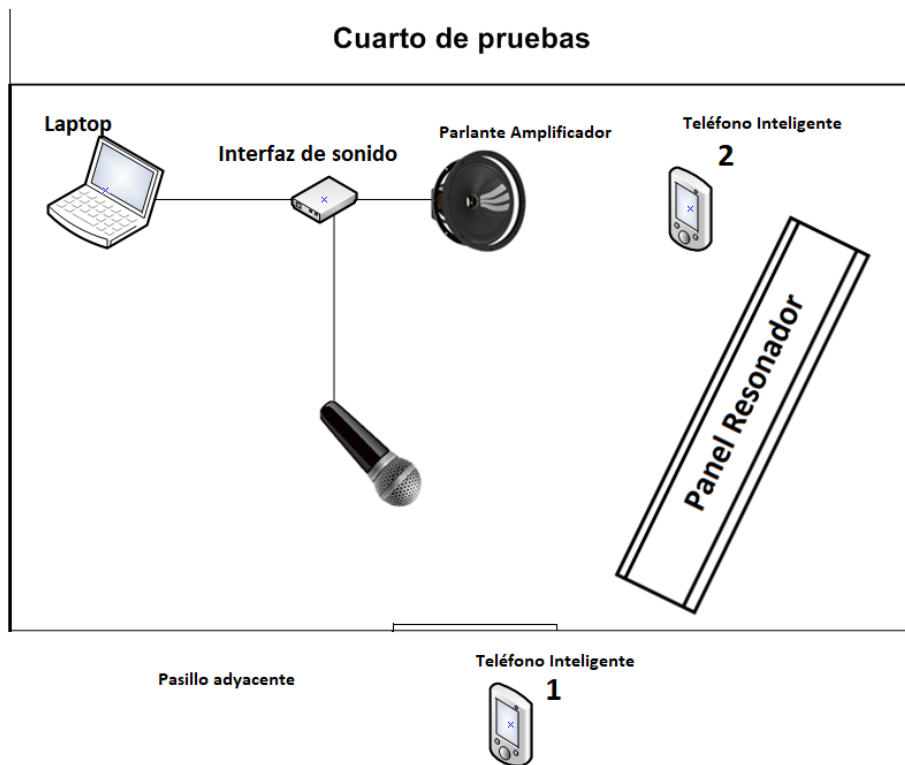


Ilustración 3 Set-up experimento – Micrófono en cuarto (Lascano, 2019)

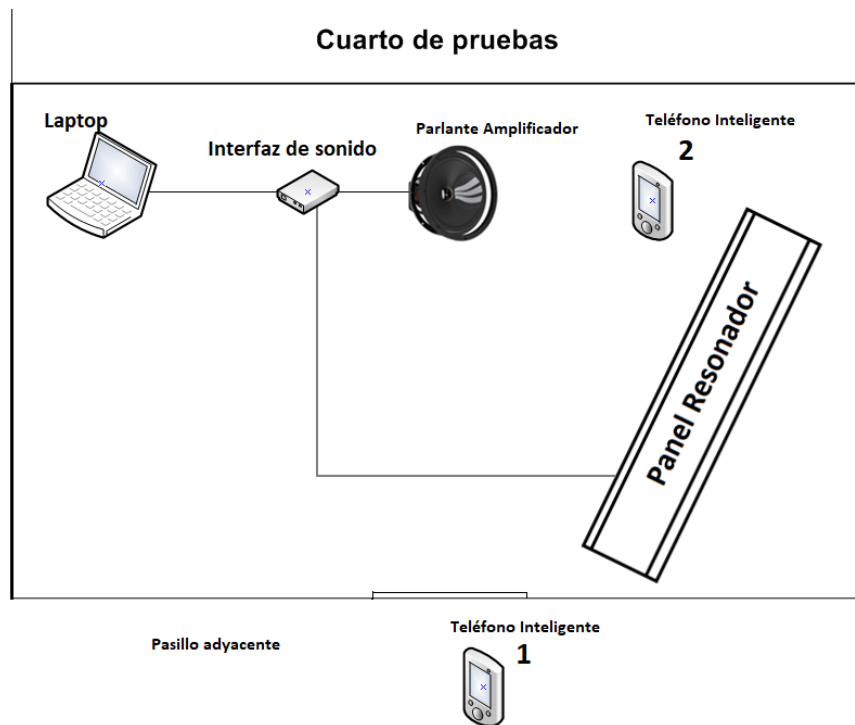
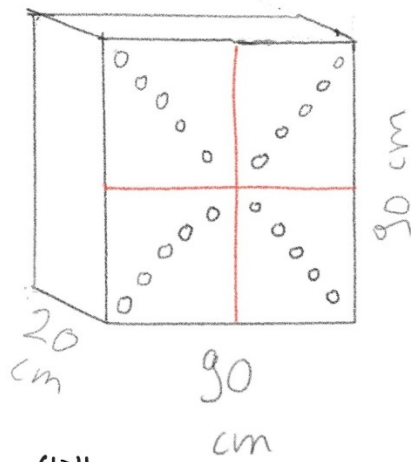


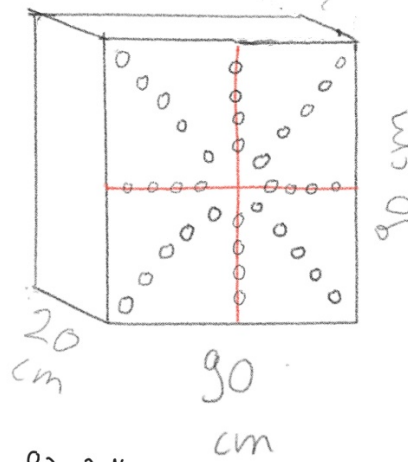
Ilustración 4 Set-up experimento - Micrófono dentro del panel resonador. (Lascano, 2019)

5.2.2 Bosquejo paneles resonadores



61.3 Hz

Frecuencia más baja



82.2 Hz

Frecuencia media baja

Ilustración 5 (Lascano, 2019)

Ilustración 6 (Lascano, 2019)

5.2.3 Paneles resonadores elaborados



Ilustración 8 - 61.3 Hz (Lascano, 2019)



Ilustración 7 - 82.2 Hz (Lascano, 2019)

5.4 Instrumentos de medición



Ilustración 9 Set up instrumentos de medición. (Lascano, 2019)

Micrófono

Interfaz de sonido.

Laptop con REW.

Parlante amplificador.

5.4.1 Software

Room EQ Wizard

Es un programa que permite medir y analizar la acústica de un recinto. Contiene herramientas para medir frecuencia, decibelios, T60, Clarity, al igual que también permite generar el audio para realizar las pruebas, como es el “ruido rosa” que está compuesto por la emisión de sonido en toda frecuencia. (Room Acoustics Software, 2018) Mediante este se realizan los gráfico y mediciones.

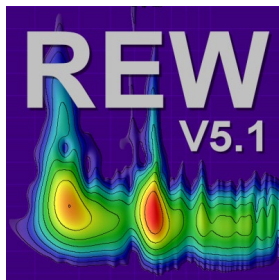


Imagen 1. REW (Room Acoustics Software, 2018)

6 Muestreo y gráficos

6.1 Resonancia alimentada por frecuencia correspondiente

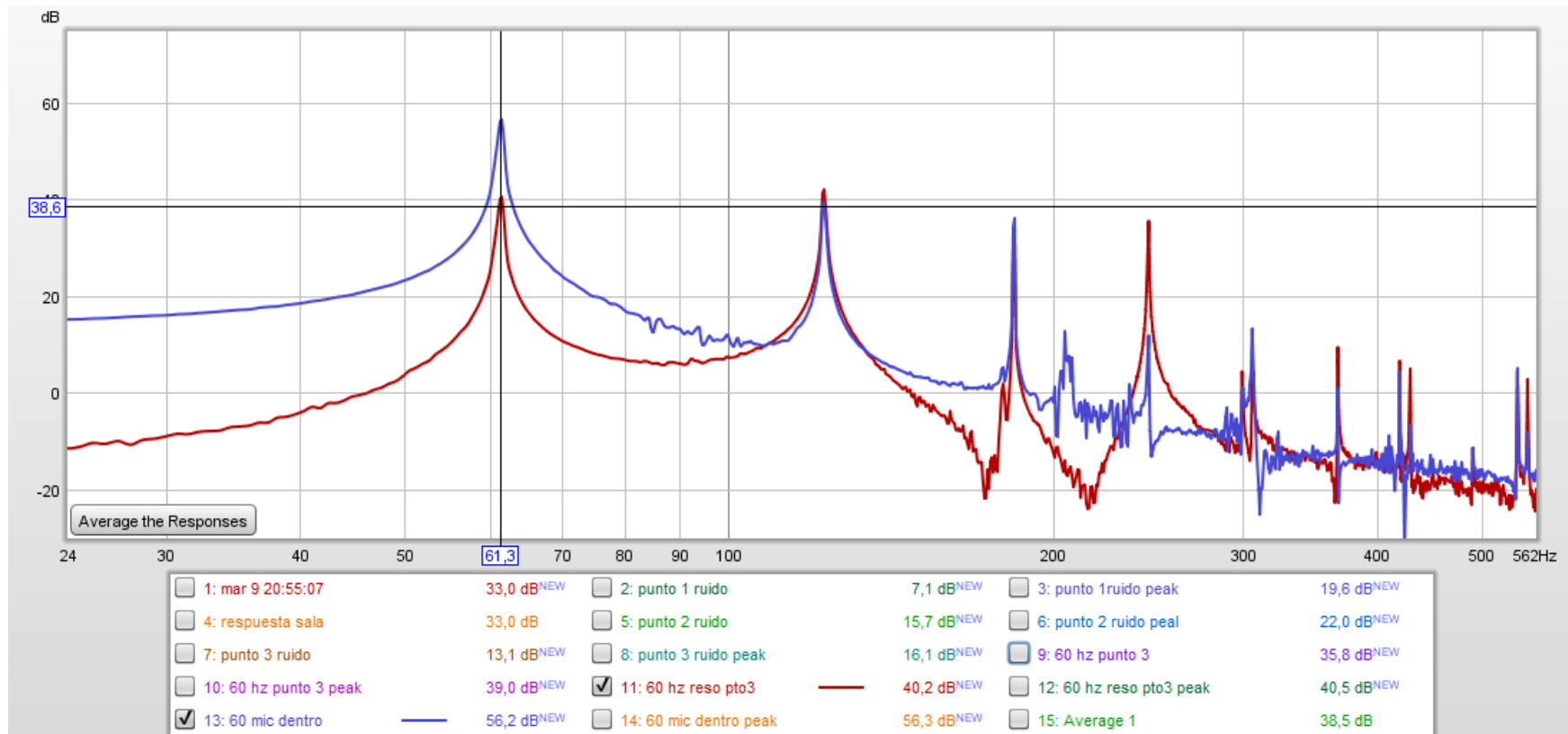


Gráfico 1. Emisión 61.3 Hz -- Micrófono en cuarto vs. Micrófono dentro del resonador (Lascano, 2019)

En esta primera gráfica se procede a comparar lo que ocurre a 61.3 Hz, **dentro del resonador** y **fuera del resonador** en la sala. Se puede apreciar que, dentro del resonador al reproducir su frecuencia de resonancia, vemos un incremento de 16 dB en contraste a la muestra tomada de la sala con el resonador, esto nos indica que el Resonador, está trabajando esta frecuencia, ya que al entrar en

resonancia se produce un mayor nivel de presión sonora en el interior de este. También se puede observar como en las demás frecuencias, se tiene un comportamiento sin muchas diferencias, lo cual nos indica que el resonador efectúa de manera discriminante al ser alimentado con su frecuencia natural. Los armónicos (picos) de la frecuencia se mantienen cerca del mismo nivel de presión sonora.

6.2 Resonancia alimentada por ruido rosa

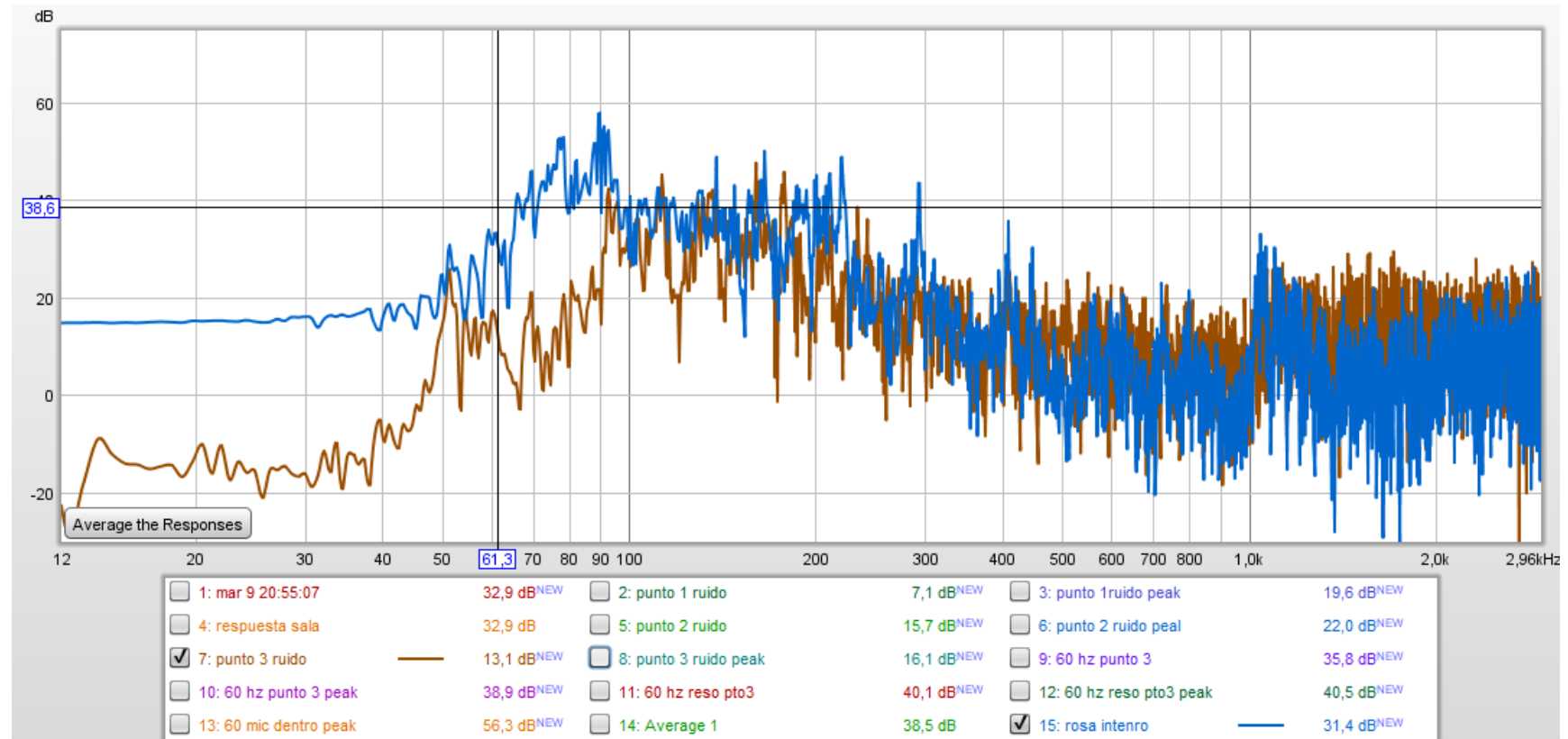


Gráfico 2. Emisión ruido rosa -- Micrófono en cuarto vs. Micrófono dentro del resonador (Lascano, 2019)

Se muestra la respuesta (gráfica) del resonador al ser alimentado por ruido rosa. Se contrasta los resultados dados por el micrófono **dentro** del resonador y **fuera** de él en la misma sala. Se puede apreciar que en la frecuencia de 61.3 Hz existe una diferencia de 18 dB, lo cual indica que el panel está actuando sobre dicha frecuencia. Sin embargo, este no solo efectúa en ese punto de manera selectiva, también se puede observar un cambio en los decibelios de otras frecuencias, resalta la diferencia de 45 dB a los 90 Hz. Esta información demuestra que el resonador no actúa solo sobre una frecuencia al ser expuesto a ruido, pero más bien sobre un rango de estas. Incluso, se puede afirmar que este es más efectivo a los 90 Hz en este escenario.

6.3 Tiempo de reverberación sala sin resonadores

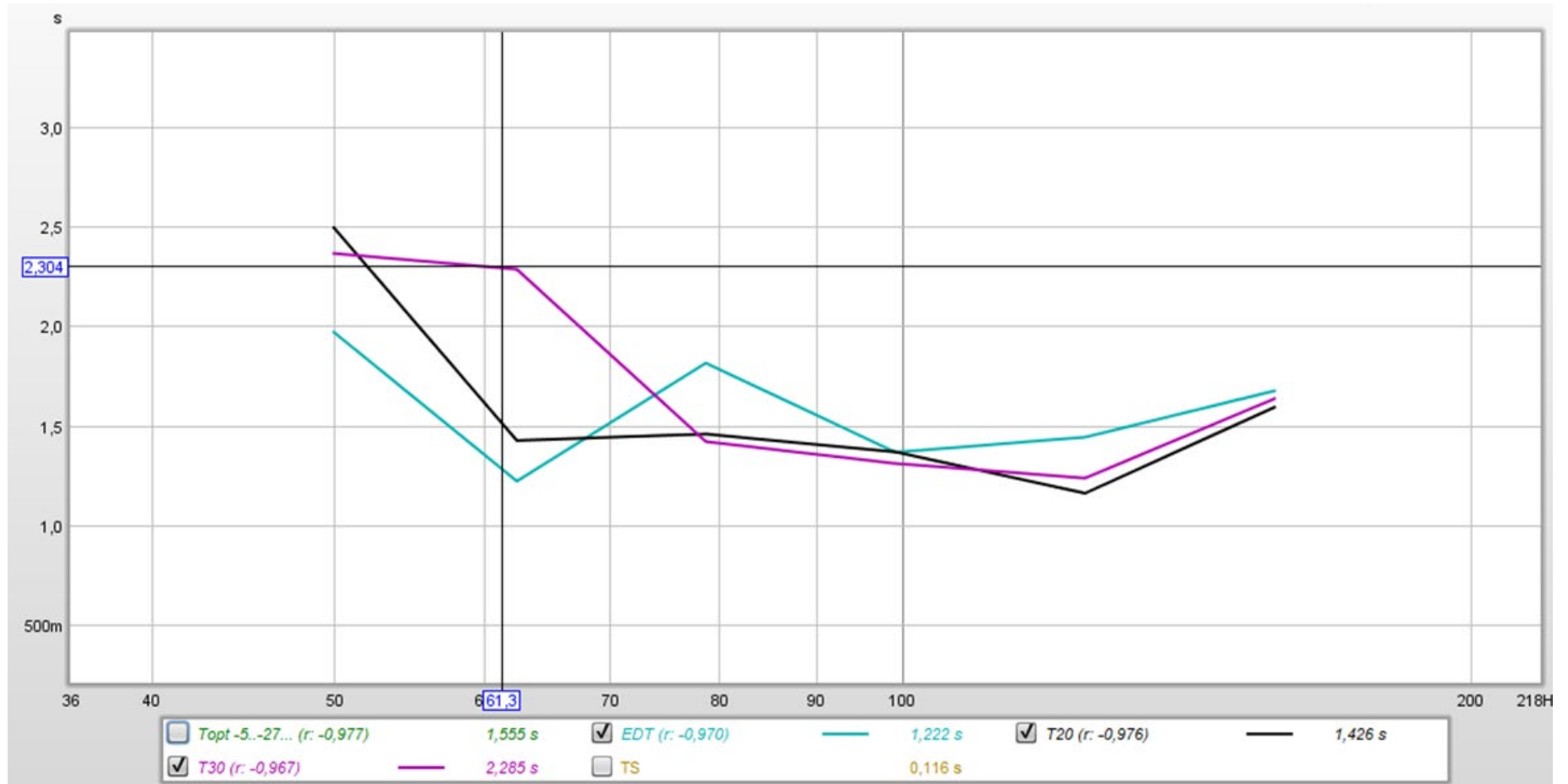
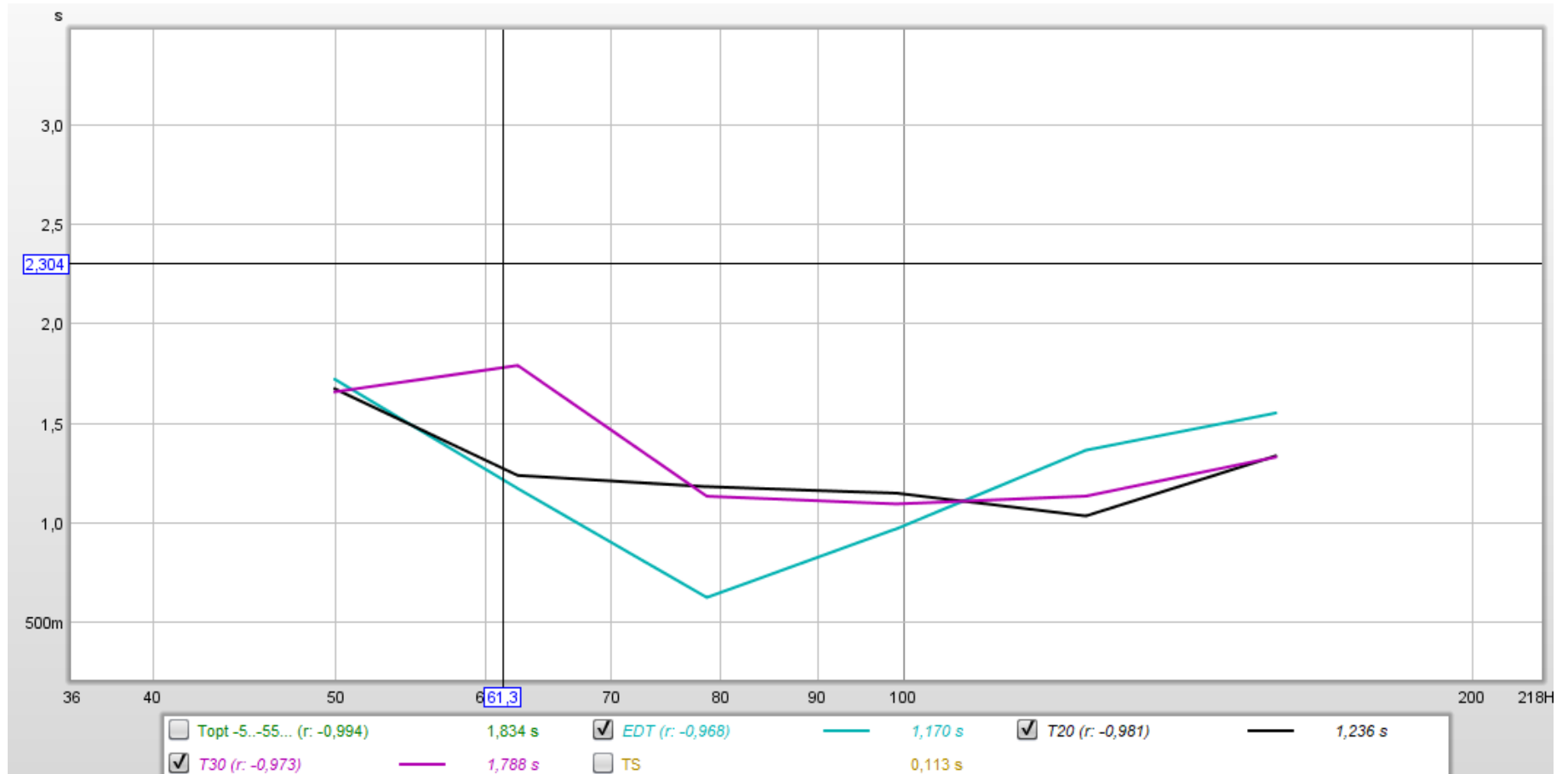


Gráfico 3. Tiempo de reverberación del cuarto representados en T20 T30 y EDT (Lascano, 2019)

Se muestra el Tiempo de reverberación de la sala sin la presencia del panel resonador en representado por T20 y T30, cuyos valores respectivos son de 1.423 y 2.285 segundos.

6.4 Tiempo de reverberación sala con resonador



Al colocar el primer resonador diseñado a los 61,3 Hz, se puede observar que el tiempo del T20 y T30 en comparación al de la sala sin resonadores, mejoró ya que pasó a ser T20: 1,236 (mejora de 0.2 s) y del T30: 1,788 (mejora 0.5 s). Lo cual nos indica que el resonador está ayudando a disipar la energía dentro de la sala, disminuyendo su tiempo de reverberación a las frecuencias para las cuales fue diseñado.

7 Conclusiones

Los efectos acústicos del uso de paneles resonadores dentro de un habitación se pueden resumir en los siguientes:

1. Adecuación acústica de la sala (Armonización); el resonador causa que las diversas frecuencias emitidas se ajusten al rango de armónicos de su frecuencia. Este efecto se puede percibir puesto que cuando se emite ruido rosa en la presencia de los resonadores, el sonido no parece tan desordenado en comparación con el cuarto sin armonización.
2. Absorción en determinado rango de frecuencia; los resonadores, al absorber su frecuencia correspondiente, no solo absorbe esta, pero mas bien un rango alrededor de esta como se muestra en Figura 10 Disposición del material absorbente. (Carrión, 1998) Por ende, existe una disminución en los decibelios de frecuencias bajas en el rango de la frecuencia natural del resonador.
3. Disminución del tiempo de reverberación; el cual en términos comunes quiere decir que el eco dentro de la sala disminuye. Esto se debe a que el resonador esta de manera constante captando ondas sonoras y en ciertos casos las retiene, lo cual causa que, al momento de apagar la fuente de sonido, no habrá tantas ondas sonora rebotando entre las paredes de la sala en contraste con el caso que no hubiese resonador.

El tercer efecto es en el cual se enfoca la investigación, se concluye que los resonadores afectan de manera positiva el tiempo de reverberación, puesto que este se disminuye, a su vez permitiendo que no haya tanta distorsión sonora al momento de necesitar un ambiente en el cual se pueda distinguir de manera precisa los sonidos, tal es el caso de un estudio de música, en donde se ocupan los paneles resonadores, o en auditorio, que en ciertos casos incluso presentan orificios diseñados en el mismo.

Una posible aplicación del conocimiento de la reverberación y resonadores es para el diseño de salas de grabación o de video conferencias de varias personas, en cuyos casos se necesita que exista el menor ruido posible el cual puede ser dado por distorsión como causa de la reverberación o como ondas sonoras de baja frecuencias transmitidas de una edificación o sala a otra.

8 Bibliografía

- Brüel, P. (1951). *Sound insulation and room acoustics*. Chapman Hall.
- Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Univ. Politéc. de Catalunya Barcelona: Edicions UPC.
- Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers*. London & New York: Taylor & Francis.
- Divincenzo, N. (06 de Septiembre de 2018). *Natural Frequency and Resonance*. Recuperado el 19 de Febrero de 2019, de Siemens PLM: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/Natural-Frequency-and-Resonance/ta-p/498422>
- Ecophon. (s.f.). *Tiempo de reverberación*. Obtenido de Ecophon: https://www.ecophon.com/es/soluciones-acusticas/Banco-de-conocimientos-acustica/Acustica-basica/Descriptores-Acusticos-de-la-Estancia/Reverberacion/Tiempo_de_reverberacion/
- Estellés, R. (2010). *Reflexión y absorción*. Montevideo: Facultad de Arquitectura UDELAR.
- Everest, F. A. (2001). *The Master Handbook of Acustics*. McGraw-Hill.
- Fernández, D., Sánchez, I. F., & Gilberto, L. G. (Mayo de 2011). ANÁLISIS, DISEÑO Y APLICACIÓN DE RESONADORES ACÚSTICOS. Córdoba, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- Heinrich, K. (2009). *Room Acoustics*. London & New York: Taylor & Francis.
- Helmholts, H. L. (1875). *Sensations of Tone*. London: Longmas, Green , and Co.
- Helmholtz Resonators - Basic Analytic Devices*. (s.f.). Obtenido de Seas Harvard: https://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/nu_lectures/lecture3%20/ho_helmholtz/ho_helmholtz.html
- Jesus, J. (27 de 09 de 2018). *Building my Music Studio - Part 3 - Bass Traps - Helmholtz Resonator - DIY - How to*. Obtenido de J Jesus. YouTube:

<https://www.youtube.com/watch?v=d9BHlajPvjs&list=FL9d61FT8IKknryroA4ZE0vQ&index=3&t=1s>

Lascano, L. E. (31 de 01 de 2019). Quito, Pichincha, Ecuador.

Long, M. (2006). *Architectural Acoustics*. London: Elsevier Academic Press.

Løvholt, F., Norèn-Cosgriff, K., Madshus, C., & Ellingsen, S. E. (2017). Simulating low frequency sound transmission through walls and windows by a two-way coupled fluid structure interaction model. *Journal of Sound and Vibration*, 203-216.

Medina, H. (s.f.). *Movimiento Oscilatorio*. Obtenido de Repositorio PUCP: http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/7140/Medina_Fisica3_Cap3pdf?sequence=3

Mon Happy. (2017). Obtenido de Vibration engineering theorem - Basic example solution using MATLAB: <https://monhappy.tistory.com/65>

Nave, R. (s.f.). *Hyper Physics*. Obtenido de Cavity Resonance: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

Olmo M, N. (s.f.). *Resonancia de Cavidad*. Obtenido de Hyperphysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Waves/cavity.html#c1>

Room Acoustics Software. (27 de Agosto de 2018). *Room Acoustics Software-Download*. Obtenido de Room EQ Wizard: <https://www.roomeqwizard.com/>

Sancho, J., & Ulin, V. (30 de Septiembre de 2011). Absorción sonora de un resonador de placa a partir su comportamiento vibratorio. Madrid, España: Departamento de ingeniería audiovisual y comunicaciones.

Sau, V. (2015). *¿Qué es el tiempo de reverberación?* Obtenido de Aislacustic: <http://aislacustic.com/que-es-el-tiempo-de-reverberacion/>

Soufflé, F. J. (s.f.). *Resonancias de Helmholtz*.

Turrull, I. R. (s.f.). *CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE RESONADORES DE HELMHOLTZ*. Barcelon, España: Departament d'Acústica, Enginyeria La Salle,

Universitat Ramon Llull. Obtenido de http://sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/publicaciones_4355ev026.pdf

Weisstein, E. W. (2007). *Helmholtz Resonator*. Obtenido de Wolfram Research: <http://scienceworld.wolfram.com/physics/HelmholtzResonator.html>