

ANÁLISIS, DISEÑO Y APLICACIÓN DE RESONADORES ACÚSTICOS

DIEGO FERNÁNDEZ¹, IMANOL F. SÁNCHEZ¹ Y LUCAS G. GILBERTO¹

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC). Maestro López esq. Cruz Roja Argentina, CP X5016ZAA, Córdoba, Argentina
el_diego@hotmail.com, imanol236@hotmail.com, guilaltea87@hotmail.com

Resumen – En este trabajo se presenta de forma breve y sucinta las principales características de resonadores acústicos y los cálculos necesarios para su diseño. Además, se estudia el complemento con otros materiales y las distintas configuraciones y clasificaciones de este tipo de elementos. Por último, se analiza el fenómeno de resonancia acústica como principio físico de funcionamiento, hasta llegar a aplicaciones conocidas y materiales utilizados en el acondicionamiento acústico en el espectro de bajas frecuencias.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existen variadas herramientas, materiales y dispositivos para alcanzar un óptimo diseño acústico de un recinto. Esto se logra principalmente manipulando tres aspectos básicos del sonido: su absorción, reflexión y difusión. En el marco del estudio de la absorción de la energía en un recinto se pueden mencionar como principales protagonistas el aire, el público, las sillas y los materiales presentes en la construcción de la sala (incluyendo puertas, ventanas, etc.) y a los elementos absorbentes colocados intencionalmente como tratamiento acústico. Entre estos últimos se encuentran los denominados resonadores acústicos (RA), elementos absorbentes selectivos, usados ampliamente en el acondicionamiento acústico, con especial utilización en las bajas frecuencias.

El propósito de este trabajo es analizar estos elementos, haciendo referencia a sus clasificaciones y cálculos necesarios para su construcción. También se abordarán aplicaciones típicas y existentes en algunos recintos característicos.

En primera instancia se presenta el principio físico de funcionamiento de estos dispositivos, la resonancia acústica, explicando las relaciones entre las variables que se asocian para generar la absorción. A continuación se clasificarán los distintos tipos de RA para luego entrar en el análisis particular de cada uno. Finalmente se muestran algunas aplicaciones de estos elementos.

2. RESONANCIA ACÚSTICA

Es el fenómeno que da origen a estos elementos absorbentes, y tiene una especial importancia en el campo de la acústica arquitectónica.

Un ejemplo muy común de este comportamiento acústico-mecánico se manifiesta al pasar un automóvil por el frente de una casa; se observa que los cristales de las ventanas de ésta vibran (“resuenan”). Si se considera en vez del cristal de una ventana una varilla, la cual hacemos vibrar, ésta lo

hará en íntima relación con su longitud. Otro ejemplo que pone de manifiesto el fenómeno de resonancia es el de dos diapasones idénticos, y próximos el uno al otro, se observa que al hacer vibrar uno de ellos el otro comienza a vibrar, esto se debe a que al ser idénticos vibran con la misma frecuencia y por tanto están en resonancia. Todas estas vibraciones resultan entonces funciones de las características geométricas de un objeto.

Ahora bien, si se considera un tubo con una boca abierta y la otra cerrada cuya longitud podemos aumentar y disminuir. Se demuestra que si por la boca abierta entra una onda sonora, de frecuencia determinada, podemos observar que la intensidad del sonido aumenta y disminuye a medida que variamos la longitud del tubo. Esto es debido a que la onda sonora que entra en el tubo se refleja en la pared final, y se refuerza con la oscilación entrante, si estas dos están en fase. Se obtiene así una onda estacionaria dentro del tubo siempre y cuando la longitud del tubo y la longitud de la onda de presión (λ) estén relacionadas bajo un múltiplo impar de $\frac{1}{4}$. En esos casos se dice que el foco emisor del sonido y la columna de aire del interior del tubo están en resonancia, ver figura 1.

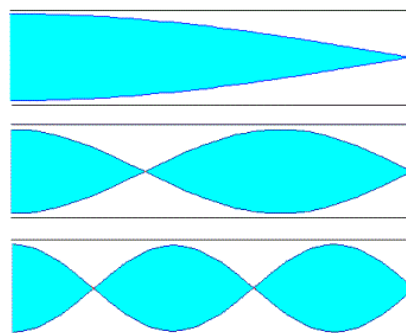


Figura 1: Ondas estacionarias en un tubo cerrado por uno de sus lados

Si L es la longitud del tubo, las ecuaciones correspondientes estas resonancias son:

$$L = \frac{(2n+1)\lambda}{4} \quad (1)$$

con $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ y:

$$\lambda = c / f \quad (2)$$

con c : velocidad del sonido y f : frecuencia de la onda. Resulta finalmente:

$$f = \frac{c}{L} \times \frac{(2n+1)}{4} \quad (3)$$

Por otro lado si el tubo se encuentra abierto por ambos lados la resonancia se da a múltiplos de $\frac{1}{2} \lambda$, ver figura 2

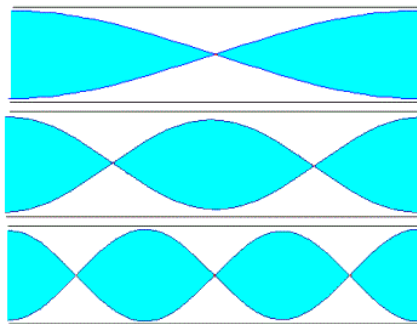


Figura 2: Ondas estacionarias en un tubo abierto por ambos lados

Siguiendo las relaciones expuestas anteriormente las frecuencias de resonancia se pueden calcular a partir de:

$$f = \frac{n}{2} \times \frac{c}{L} \quad (4)$$

con $n = 1, 2, 3 \dots$

El fenómeno expuesto puede ser un inconveniente en la reproducción del sonido, pero dadas ciertas condiciones controladas se puede sacar provecho de la resonancia acústica de una fuente sonora y un elemento, este es el caso de los RA que se explicarán a continuación.

3. ELEMENTOS ABSORBENTES

SELECTIVOS (RA).

Como se mencionó en la introducción, a la hora de quitar energía de una onda sonora intervienen muchos factores. Todos estos tienen características propias, y una acción determinada sobre la acústica del recinto. En general los materiales absorbentes porosos dispuestos sobre una pared rígida no presentan una absorción considerable a bajas frecuencias [1]. Si el diseño de la sala requiere

controlar este tipo de señales se debe recurrir a los RA.

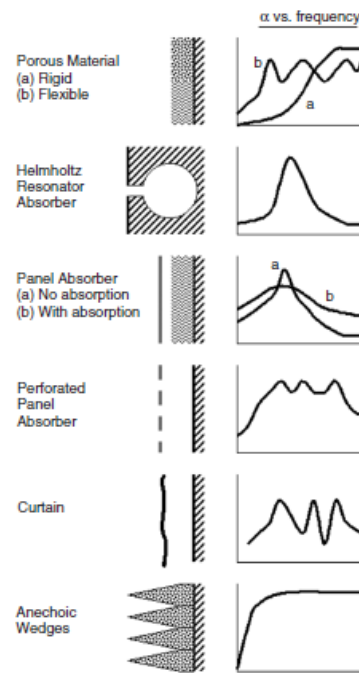


Figura 3: Comportamiento de distintos elementos absorbentes.

La figura 3 muestra diferentes elementos utilizados para el tratamiento acústico [2]. Se ve claramente como estos dispositivos presentan una frecuencia de resonancia en la que la absorción es máxima, resultando en un elemento de características selectivas. Esta frecuencia generalmente está por debajo de 500 Hz [1].

Los RA más comunes se pueden clasificar de 4 formas:

- 1) De membrana o diafragmático.
- 2) De Helmholtz de simple cavidad.
- 3) De Helmholtz de múltiple cavidad a base de paneles perforados o ranurados.
- 4) De Helmholtz de múltiple cavidad a base de listones.

3.1 RA de membrana o diafragmático

Contrariamente a la creencia popular que afirma que el revestimiento de una pared con paneles delgados favorece a la acústica de una sala debido a su efecto amplificador, en esta sección se analizará el efecto absorbente de tal disposición. Como se muestra en la figura 4 un RA de este tipo consta de un primer material de masa M por unidad de área (puede ser un panel de madera o yeso) dispuesto frente a una pared rígida a una cierta distancia d , sostenido por sus extremos que están a una distancia L . En la cavidad encerrada suele existir aire o algún material poroso.

El funcionamiento de este tipo de RA se basa en la capacidad que tiene el panel de entrar en vibración ante la incidencia de una onda sonora.

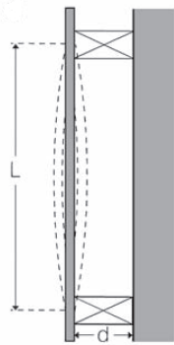


Figura 4: RA de membrana.

Si se analiza la impedancia acústica [3] de este sistema se deduce que:

$$Z = r_s + j(\omega M - \frac{\rho_0 c^2}{\omega d}) \quad (5)$$

donde la parte real r_s representa todas las pérdidas originadas por vibraciones, las cuales se pueden deber a varias causas físicas. Una de estas tiene que ver con el hecho de que cualquier tipo de panel debe ser sujetado en sus extremos, forzándolo a éste a flexionarse cuando vibra. Esta flexión y todas las deformaciones elásticas asociadas generan una pérdida de energía de la onda que viaja en el aire. Es así que se da lugar a la transformación de energía acústica en calor, que tiene un pico de absorción relacionado con las dimensiones geométricas de los elementos asociados (frecuencia de resonancia).

Debido a que estos elementos son diseñados para absorber en el rango bajo de frecuencias, el diseño del resonador implica la suposición de que la distancia d es mucho menor que λ (a 500 Hz la longitud de onda es de aproximadamente 70 cm). A estas frecuencias el aire encerrado en la cavidad actúa como un muelle, cuya rigidez aumenta a medida que el volumen de la misma disminuye [1]. Esta rigidez trabajando en conjunto con el panel representan un sistema resonante, esto equivale a decir que los coeficientes de absorción presentan un máximo a la frecuencia f_0 que viene dado por la ecuación:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{M \times d}} \quad (6)$$

con f_0 en Hertz, y recordando que M : masa del panel por unidad de superficie (Kg/m^2) y d la distancia entre el panel y la pared rígida (cm) [4].

En la siguiente gráfica se observan distintos coeficientes de absorción teóricos para resonadores de membrana, considerando una onda sonora de incidencia normal y la relación $2\pi f_0 M = 10\rho_0 c$. Se distinguen diferentes curvas a medida que la relación entre $r_s/\rho_0 c$ varía. La selectividad y absorción del resonador es máxima para $r_s = \rho_0 c$. Cuando $r_s > \rho_0 c$ la curva presenta un ensanchamiento, distribuyendo la absorción en una banda más amplia de frecuencias. Es razonable pensar bajo este punto que incrementando r_s mediante el agregado de un material

absorbente en la cavidad se puede controlar la curva. Esto permite un diseño más ajustado del RA, adecuándolo a las prestaciones necesarias.

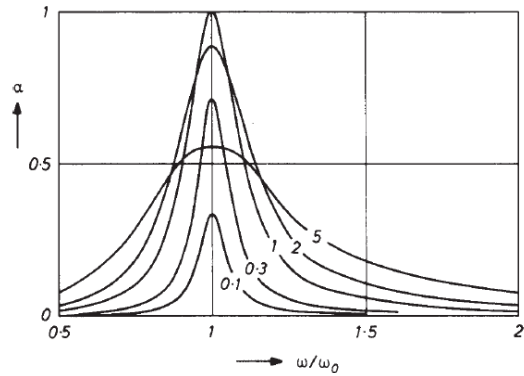


Figura 5: Coeficientes de absorción teóricos vs. frecuencias angular normalizada; para un sistema con $2\pi f_0 M = 10\rho_0 c$ y distintas relaciones de $r_s/\rho_0 c$ [3].

La figura 5 muestra una solución para el diseño basándose en la resolución de la ecuación (6) para distintos valores de f_0 y de M [4]. Conociendo estos valores se puede encontrar rápidamente la distancia d necesaria para que un panel determinado produzca su pico de resonancia a una frecuencia prevista.

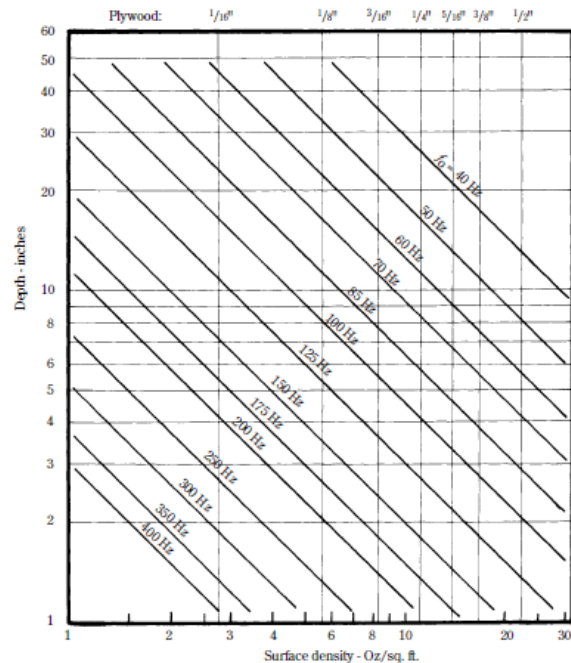


Figura 6: Asociación de los distintos parámetros de un RA de membrana para un diseño conveniente.

3.2 RA de Helmholtz de simple cavidad.

Este resonador está formado por una cavidad de aire cerrada conectada a la sala a través de una abertura o cuello estrecho.

En la siguiente figura se muestra un esquema de cómo se compone este resonador.

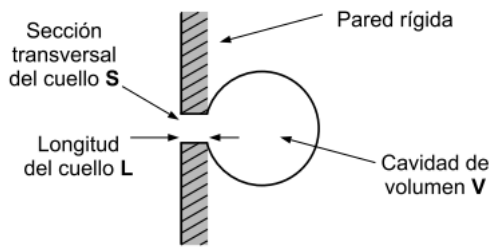


Figura 7: Esquema básico de un resonador Helmholtz de cavidad simple.

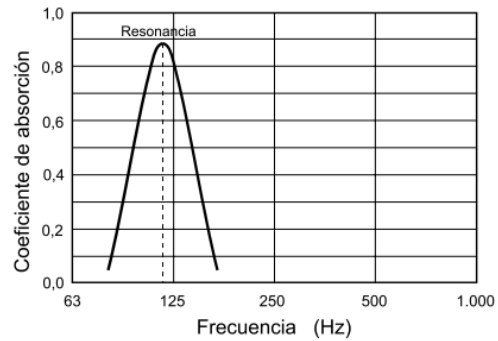


Figura 8: Coeficiente de absorción de un resonador Helmholtz de simple cavidad

A frecuencias bajas, se cumplen lo siguiente:

$$L \ll \lambda$$

$$\sqrt[3]{V} \ll \lambda \quad (7)$$

El aire cuello se mueve como una unidad, y constituye el elemento de masa, mientras que el aire de la cavidad se comporta como un muelle, constituyendo el elemento de rigidez [1]. De forma análoga al resonador de membrana, la masa del aire del cuello junto con la rigidez del aire de la cavidad dan lugar a un sistema resonante que presenta un pico de absorción a la frecuencia de resonancia f_0 . En este caso, la expresión teórica para el cálculo de f_0 es la siguiente [1]:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{LV}} \text{ (en Hz)} \quad (8)$$

Donde:

- S = sección transversal del cuello (cm²)
- L = longitud del cuello (cm)
- V = volumen de la cavidad (cm³)

Si bien esta fórmula parece arrojarnos la frecuencia f_0 exacta, en la realidad solo son valores aproximados de la misma, incluso con factores de correcciones que se suelen aplicar. De todas maneras, estos valores que nos arroja la anterior fórmula, son suficientemente válidos para la aplicación del diseño de los mismos [1].

En el gráfico de la figura 8 se muestra la gráfica del coeficiente de absorción en función de la frecuencia. Se puede observar la selectividad de estos absorbentes. En la práctica no se utilizan sólo un absorbente en la sala, sino, ya que su sección transversal es extremadamente pequeña. En cambio, se utilizan arreglos de resonadores de cavidad simple dispuesto de la manera que lo muestra la figura 8 [1].

Lógicamente, a igualdad de dimensiones y formas, la frecuencia de resonancia de todos ellos es la misma, puesto que no existe ningún tipo de conexión entre las diversas cavidades. Este tipo de resonador es frecuentemente utilizado para eliminar los modos propios más significativos existentes en salas pequeñas, como por ejemplo locutorios o estudios de grabación, causantes del denominado efecto de coloración. También se usa en aquellas salas grandes que disponen de un sistema de resonancia asistida como parte integrante de las mismas. Por último cabe mencionar que el hecho de que estos resonadores puedan rerradiar sonido cuando son excitados por una onda sonora, ha llevado tradicionalmente a la conclusión errónea de que pueden producir un efecto destacado de amplificación. Ya en la antigüedad, el arquitecto romano Vitruvio justificaba la utilización de vasijas de barro con cuellos más bien estrechos situadas entre los asientos de los teatros, afirmando que amplificaban el sonido y mejoraban la inteligibilidad de la palabra [1].

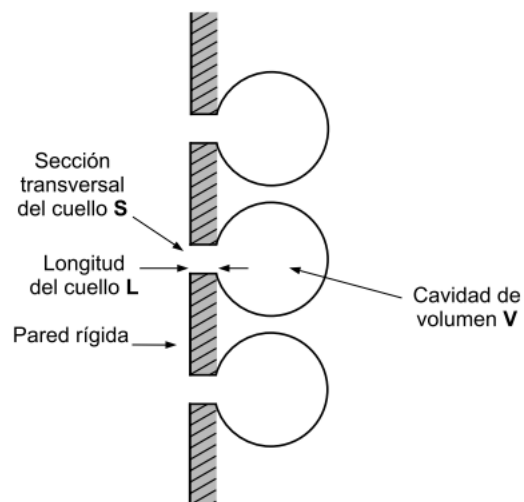


Figura 9: Arreglo de resonadores de cavidad simple.

3.3 RA de Helmholtz de múltiple cavidad a base de perforaciones y ranuras

Esta clase de RA está constituido por un panel no poroso y rígido de espesor D , que además cuenta con perforaciones que pueden ser circulares o de tipo rectangular. Este panel (que puede ser de madera, cartón-yeso, chapa, ladrillo, etc.) se dispone de tal forma que haya una cavidad de aire de una ancho d entre el panel y una pared rígida. En la siguiente figura se muestra este tipo de resonador:

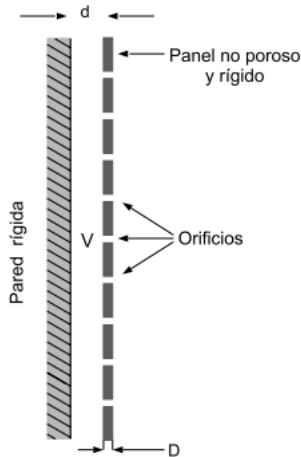


Figura 10: RA de Helmholtz a base de paneles perforados o ranurados

Al igual que en los casos anteriores esta distancia d es mucho menor que λ a la frecuencia de resonancia del dispositivo. En este punto se puede considerar al elemento resonador bajo dos puntos de vista: como si fuera un RA de diafragmático, donde la función del panel es sustituida por la masa del aire encerrada en cada perforación, o como un conjunto de RA simples de Helmholtz que comparten una misma cavidad [1].

La ecuación que rige este dispositivo es igual que la (8), sólo que en vez de hablar de una longitud del tubo utilizaremos el espesor D del panel. Ahora bien, el volumen de aire encerrado es:

$$V = S_p d \quad (9)$$

donde S_p : la superficie del panel y d : distancia entre la pared y el panel. Considerando ahora la relación entre la superficie del panel y la superficie de sus perforaciones:

$$p = S / S_p \quad (10)$$

la ecuación (8) tomará la forma de [1]:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{p}{Dd}} \quad (11)$$

Se observa también en este caso una desviación de f_0 debido a que la masa efectiva contenida dentro de los orificios es mayor que la encerrada en el

volumen que ocupan [1]. De esta manera la fórmula anterior sustituye el valor D por D' , con D' dependiente del tipo de RA, es decir si es a base de perforaciones o ranurado.

Si tomamos el primer caso y tenemos en cuenta una distribución uniforme de las perforaciones en la superficie se ve claramente que la relación p es:

$$p = \frac{\pi a^2}{D_1 D_2} \quad (12)$$

con D_1 y D_2 como se muestra en la figura 11. Las correcciones incorporadas por D' responden en este caso con un incremento del espesor real en 1,6a (radio del orificio).

Retomando los cálculos para un panel ranurado la relación p se establece de la siguiente manera:

$$p = \frac{a_1 a_2}{D_1 D_2} \quad (12)$$

y la corrección es la misma que en el anterior caso, considerando que a es

$$a = \sqrt{\frac{a_1 a_2}{\pi}} \quad (13)$$

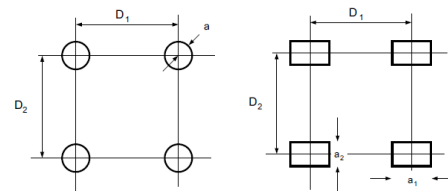


Figura 11: Distribución uniforme de los orificios de un panel a base de perforaciones y a base de ranuras.

Una de las características particulares de este RA es que su selectividad es menor que en los casos anteriores. Esto es consecuencia del acoplamiento entre los diferentes orificios [1]. Como se explica en la sección 3.1 al agregar un material absorbente poroso en la cavidad el comportamiento del dispositivo es de alguna manera configurable.

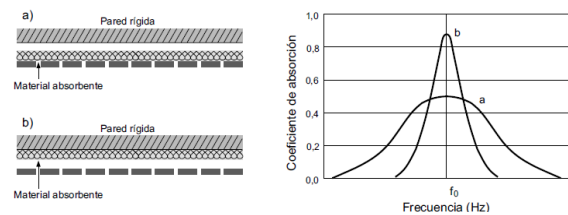


Figura 12: Efecto del agregado de un material de fibra mineral dispuesto de dos formas diferentes.

En este caso la disposición del material absorbente determina la curva de absorción final, distinguiéndose particularmente 2 casos: con el material absorbente en contacto con el panel o con la pared rígida. La selectividad del elemento cambia considerablemente debido a este efecto, ver figura 12.

3.4 RA de Helmholtz de múltiple cavidad a base listones

Este RA es una construcción a base de listones o barras de un espesor D dispuestas uniformemente a una distancia d de una pared rígida, ver figura 13.

Este tipo de RA se comporta de manera muy similar al descrito anteriormente, considerando en este caso que la masa que se debe considerar como elemento oscilador es la contenida entre los espacios que dividen un listón de otro.

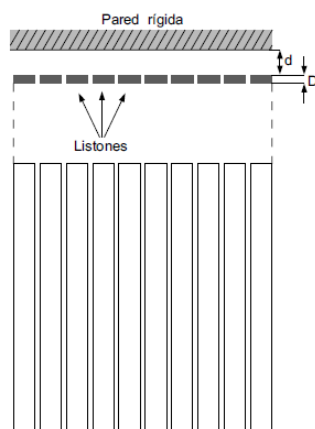


Figura 13: RA de Helmholtz de múltiple cavidad a base de listones.

Las ecuaciones para calcular la resonancia son idénticas que el modelo a base de perforaciones o ranuras, excepto que en este caso:

$$p = S / S_p = \frac{r}{r + w} \quad (14)$$

donde r: separación entre listones y w: ancho del listón. Aquí también toma lugar una corrección debido a la masa de aire efectiva oscilante, D es ahora $D' = 1,2 D$. Esto lleva finalmente a la ecuación (15) para el cálculo de f_0 [1].

$$f_0 = 5002 \sqrt{\frac{r}{Dd(r + w)}} \quad (15)$$

Las consideraciones respecto a la incorporación de materiales absorbentes hechas en los RA a base de paneles perforados o ranurados valen para este caso también.

A partir de la ecuación (15) es natural pensar que a medida que los listones se vuelven más pequeños y la separación entre ellos aumenta. La figura 14 refleja este efecto considerando distintos porcentajes de abertura de estos RA.

En último lugar se dirá que el diseño se puede manipular alterando las relaciones geométricas de estos elementos. La figura 16 muestra cómo se podría cambiar la distancia D en un RA a base de listones y otro a base de perforaciones. Esto rescinde en una curva menos selectiva y de pendientes más suaves. Lo mismo sucede al incrementar las superficies abiertas en ambos casos.

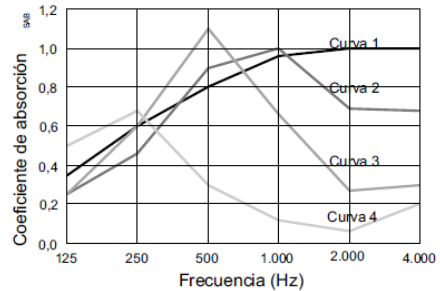


Figura 14: Variación de coef. de absorción en función de distintos porcentajes de perforación (curva 2: 50%, curva 3: 14%). La curva 1 representa la absorción de lana de roca de 45 mm y la curva 4 representa un RA de membrana con panel de 12 mm, D=50mm y el mismo material absorbente dentro.

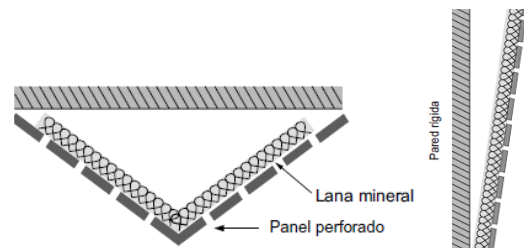


Figura 15: Manipulación del diseño a base del cambio de la geometría de RA.

4. APLICACIONES GENERALES

En esta sección se tratará la utilidad de los RA en distintas circunstancias y lugares, así como algunos materiales existentes en el mercado.

Una de las aplicaciones más interesante de los resonadores diafragmáticos es el recubrimiento de materiales absorbentes porosos con láminas elásticas de plástico o papel. Con esta disposición se crea un RA diafragmático delante del material poroso, esta asociación permite compensar las malas atenuaciones en bajas frecuencias [1], ver figura 16 [5].

Resonadores de Helmholtz de múltiple cavidad a base de listones o ranurados son utilizados generalmente en cines o salas de proyección. La firma Ideatec provee elementos de este tipo trabajados en madera [6].

En cuanto a aplicaciones de RA de simple cavidad de Helmholtz se puede mencionar a la sala de conciertos de la Berlin Philharmonie, en cuyo techo estos resonadores absorben las bajas frecuencias, ver figura 18 [1].

En la figura 19 se observa una aplicación en la que se instalaron anchos perfiles metálicos perforados para exteriores; al fondo, resonadores Helmholtz perforados a 125 Hz. En la fig. 20 se exhibe un muro resonador divisorio con perforaciones y en la fig. 21 se puede ver resonadores de Helmholtz de tipo perforados, utilizados en conjunto con paneles absorbentes colgados en el techo [7].



(a)



(b)

Figura 16: (a) Andina PVC: Panel de lana de vidrio revestido con un PVC gofrado. (b) Sala de proyección acondicionada con paneles Andina Isoacoustic construidos a base de lana de vidrio revestido con un velo de vidrio en la cara vista. Ambas de la firma Isover.



(a)



(b)

Figura 17: Paneles resonadores absorbentes de la firma IdeaTec. (a) RA de Helmholtz a base de paneles ranurados en una sala de cine. (b) RA d Helmholtz a base de listones.

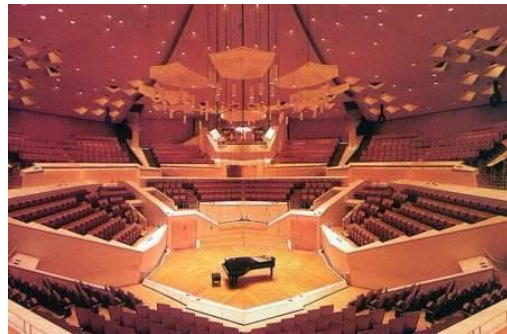


Figura 18: Resonadores de Helmholtz de simple cavidad ubicados en el techo de la Berlin Philharmonie.



Figura 19: Pabellón acústico para eventos sociales en deportivo San Agustín, AC , México.

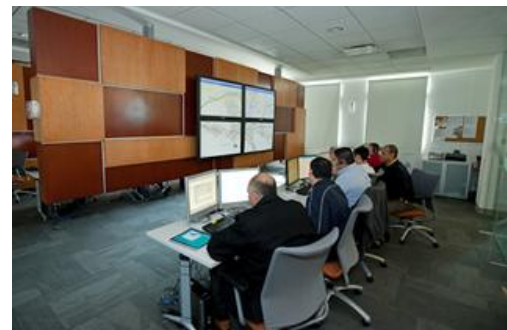


Figura 20: Call Center – ABA Seguros Cumbres, México



Figura 21: Sala anexa Multiusos del Auditorio Luis Elizondo en el ITSEM Campus Monterrey, México.

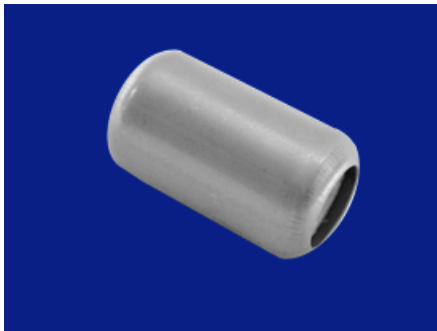


Figura 22: Silenciadores (resonadores) acústicos utilizados en la industria automotriz.

Finalmente una aplicación muy común es en el escape de gases de los automóviles. En la figura 22 se presenta un RA para tubo de escape y tubos metálicos con fibra de vidrio en el interior y los extremos reducidos y redondeados para la conducción de gases de combustión. Estos elementos logran una gran atenuación de las frecuencias graves emitidas por la combustión interna de motores [8].

5. CONCLUSIONES

Este trabajo destaca claramente la importancia de los RA en el campo del acondicionamiento de salas y acústico en general. Del análisis deviene que estos elementos presentan un diseño flexible, donde la versatilidad de los componentes más el ingenio del diseñador concluyen en absorbentes con variadas curvas de selectividad, respondiendo a cada necesidad en particular. Las complicaciones en la construcción resultan mínimas, aunque los cálculos

teóricos difieren en alguna medida de la práctica. Es necesaria en este punto la experiencia del diseñador para lograr resultados óptimos en un recinto, y un buen complemento de las herramientas absorbentes de energía para trabajar en el ancho del espectro de sonido deseado. El estudio de un sistema con adaptaciones variables queda como trabajo futuro.

6. REFERENCIAS

- [1] Antoni Carrión Isbert 1998. "*Diseño acústico de espacios arquitectónicos*". Edicions UPC, 1998.
- [2] Malcom J. Croker. "*Handbook of Noise and Vibration Control*". John Wiley & Sons, Inc 2007.
- [3] Heinrich Kuttruf 1973. "*Room Acoustics*". Spon Press 2000.
- [4] F. Alton Everest 2001. "*The Master Handbook of Acoustics*". Mc Graw Hill 2001
- [5] Saint-Gobain, Isover. *Andina PVC y Andina Isoacoustic*. <http://www.isover.com.ar/productos/>
- [6] Ideatec, Paneles para Techos y Revestimientos. *Ideacoustic*. <http://www.ideatec.es/>
- [7] Acústica Arquitectónica, Control de Ruido y Vibraciones. *Portafolios de Trabajo*. <http://www.acusticaarquitectonica.com/portafolios.html>.
- [8] Mecàniques Joan, S.L., Tubos de Escape. "*Resonador Acústico*". <http://www.mecaniquesjoan.com/>

7. DATOS BIOGRAFICOS

Imanol F. Sanchez, nacido en Rancul, Pcia. de La Pampa el 17/10/1985. Estudiante de Ingeniería en Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: Acústica de Recintos, Electrónica analógica, electroacústica.
e-mail : imanol236@hotmail.com

L. Guillermo Gilberto, nacido en Córdoba Capital, el 11/02/1986. Estudiante de Ingeniería en Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: Acústica de Recintos, Ecolocación, Realidad Acústica Virtual, Electroacústica, Sistemas de Audio.
e-mail : guillate87@hotmail.com

Diego N. Fernández, nacido en Formosa capital, el 07/05/1985. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: Electrónica de las comunicaciones, Bioelectrónica, Electroacústica, Sistemas de Control Automático.
e-mail : el_diego_@hotmail.com