



---

## PROYECTO FINAL DE CARRERA

---

# Adaptador de impedancia acústica

---

Proyecto II

### Autores

Gentile Falcone, Luciano G-5090/3  
Sigal, Ignacio S-5129/2

### Director

Ing. Fernando Vera

20 de julio de 2023

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. Objetivos generales</b>	<b>4</b>
<b>3. Fundamentos teóricos del sonido</b>	<b>6</b>
3.1. Acústica . . . . .	6
3.2. Onda incidente y reflejada . . . . .	8
3.3. Modelo circuitual . . . . .	8
3.4. Equivalente electromecánico . . . . .	11
<b>4. Métodos posibles de resolución</b>	<b>13</b>
4.1. Control pasivo . . . . .	13
4.2. Control activo . . . . .	14
<b>5. Método propuesto</b>	<b>16</b>
5.1. Método de amortiguación de derivación electromagnética . . . . .	16
5.2. Equivalente eléctrico del circuito . . . . .	17
<b>6. Escenario experimental</b>	<b>18</b>
6.1. Fundamentos teóricos . . . . .	19
<b>7. Medición del coeficiente de reflexión en tiempo real</b>	<b>21</b>
7.1. Hardware . . . . .	21
7.1.1. Tubo Acústico . . . . .	21
7.1.2. Micrófonos . . . . .	22
7.1.3. Pre-amplificador . . . . .	23
7.1.4. Altavoz . . . . .	25
7.1.5. Interfaz de audio . . . . .	26
7.1.6. PC . . . . .	26
7.2. Software . . . . .	27
7.2.1. Windows 10 . . . . .	27
7.2.2. Python . . . . .	27
7.2.3. PyCharm . . . . .	27
7.2.4. Programa de medición . . . . .	28
7.2.4.1. Librerías utilizadas . . . . .	28
7.2.4.2. Interfaz . . . . .	29
<b>8. Adaptador de impedancia</b>	<b>31</b>
8.1. Hardware . . . . .	31
8.1.1. Altavoz . . . . .	31
8.1.1.1. Altavoz elegido . . . . .	31
8.1.1.2. Parámetros propios del altavoz . . . . .	31
8.1.2. Caja acústica . . . . .	32
8.1.2.1. Diseño de la caja . . . . .	34
8.1.3. Circuito adaptador . . . . .	37
8.1.3.1. Introducción . . . . .	37
8.1.3.2. Simulación . . . . .	37

8.1.3.3. Convertidor de impedancia negativa - NIC . . . . .	38
<b>9. Resultados</b>	<b>41</b>
9.1. Medición del coeficiente en tiempo real . . . . .	41
9.2. Adaptador de impedancia . . . . .	43
<b>10. Conclusiones</b>	<b>45</b>
10.1. Medición del coeficiente en tiempo real . . . . .	45
10.2. Adaptador de impedancia . . . . .	45
<b>11. Anexo</b>	<b>48</b>
11.1. Código Python . . . . .	48
11.2. Código Matlab . . . . .	51
11.2.1. Script $Z_{cd}$ ideal . . . . .	51
11.2.2. Script $Z_{cd}$ real . . . . .	51

## 1. Introducción

En el estudio de las Ciencias Exactas, particularmente en la Física, es de vital importancia poder respaldar los desarrollos teóricos con las demostraciones experimentales.

A lo largo del desarrollo de este proyecto nos proponemos como objetivo, mediante el uso de la electrónica, poder brindar resultados experimentales, y con estos mismos, respaldar el estudio de las ondas sonoras bajo determinadas condiciones de contorno.

El proyecto tiene como objetivo la construcción de un adaptador de impedancia acústica. Se utiliza para simular un sistema de ondas propagantes en un rango de frecuencias. Inicialmente la fuente de sonido emite una onda sonora que es guiada por el tubo de Kundt<sup>1</sup>. Por otra parte, en el otro extremo del tubo, el circuito encargado de detectar la onda incidente (circuito de derivación), actuará sobre un altavoz haciendo que este absorba la perturbación de manera de poder simular una onda propagante. Esta misma tiene una dirección de propagación definida, en un sentido o en otro. En un medio infinito, la perturbación generada por el emisor se propagará en un sentido en forma indefinida. Pero en un medio finito, esto requiere que no exista onda reflejada en los extremos. No tiene reflexión en ninguna parte de su trayecto. Un posible escenario experimental se muestra en la figura 1.

Para el desarrollo teórico de este proyecto y su posterior aplicación práctica debemos obtener un equivalente eléctrico del mismo, el cual se basa en la transducción electromecánica-acústica y consta de dos etapas. La primera de ellas convierte energía eléctrica en mecánica y la segunda convierte energía mecánica en ondas sonoras. Luego, nos enfocaremos en simplificar el modelo teniendo en cuenta las condiciones del entorno.

En principio, faremos una revisión de los fundamentos teóricos de sonido, para poder explicar con mayor detalle cómo se propagan las ondas sonoras en diferentes medios, estudiando su difracción y su reflexión ante obstáculos y cambios en el medio de propagación y cómo los mismos afectan tanto a la atenuación de la onda como a su velocidad.

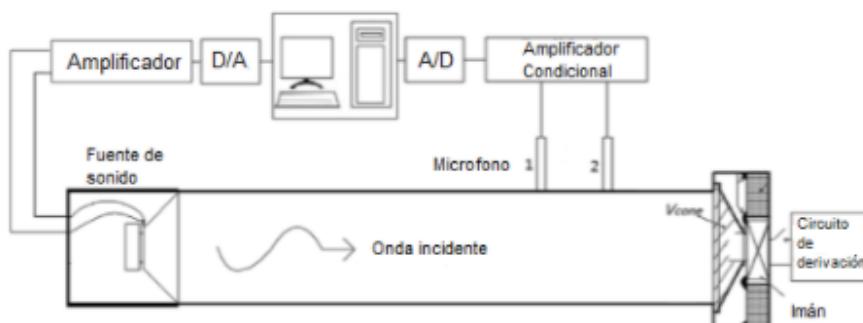


Figura 1: Esquema gráfico de un posible escenario experimental.

<sup>1</sup>Tubo de longitud finita y diámetro constante el cual es utilizado para el estudio de las ondas estacionarias y para la determinación de la velocidad del sonido.

## 2. Objetivos generales

Desde el Instituto de Física Rosario se propuso un proyecto el cual consiste en realizar un adaptador de impedancia acústica con la finalidad de poder realizar estudios prácticos sobre ondas propagantes. Actualmente en el Instituto se están realizando estudios sobre ondas sonoras con un tubo de Kundt (figura 2), evitando la libre propagación de la onda, provocando el confinamiento en las mismas.

¿Qué es el estudio de una onda confinada? Se llama estudio de onda confinada a una onda la cual se desplaza a lo largo de un tubo de diámetro constante y largo finito, haciendo así que esta no sea capaz de propagarse libremente y terminar siendo reflejada en los extremos del tubo finito.



Figura 2: Tubo de Kundt.

Al haber dentro del mismo ondas de la misma naturaleza pero con sentidos opuestos (igual amplitud, longitud de onda y frecuencia) estas suman sus amplitudes formándose antinodos. Estos son puntos en los cuales la amplitud de la onda es la máxima provocando la máxima vibración de las moléculas de aire. Además, se forman otros puntos los cuales adoptan el nombre de nodos. Estos son puntos en los cuales no hay vibraciones debido a que la sobrepresión en ese punto es nula. Esto puede observarse en la figura 3.

En cambio, una onda propagante, es una onda la cual se supone que viaja infinitamente. Para el estudio de la misma, se plantea en la teoría un tubo infinito, el cual tiene, en situación de equilibrio, presión de aire constante a lo largo del mismo así como también su diámetro haciendo las características del medio uniformes durante toda la propagación como se muestra en la figura 4.

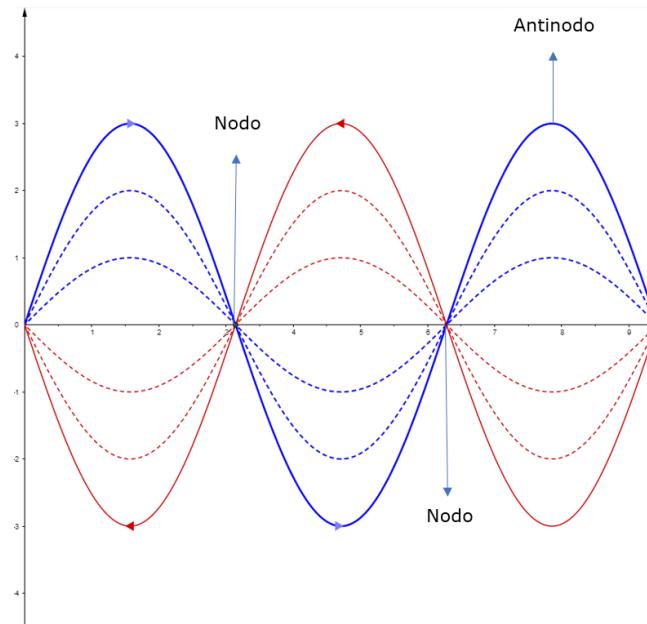


Figura 3: Representación de una onda estacionaria.

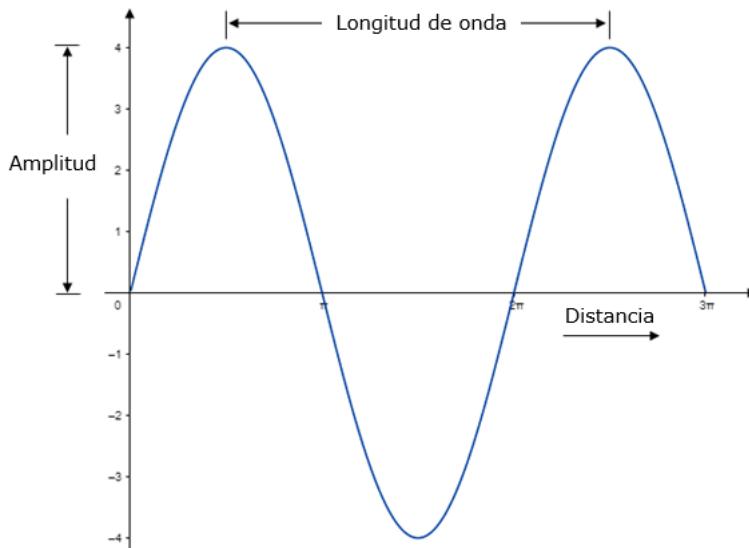


Figura 4: Representación de una onda.

Como objetivo general se propone diseñar un dispositivo el cual permita simular las condiciones de onda propagante en un rango de frecuencias en el interior de un tubo de longitud finita, permitiendo así verificar los modelos teóricos existentes en condiciones de laboratorio. Para poder cumplir con el objetivo de forma experimental, se absorberá una onda incidente en un rango de frecuencias en el final del tubo acústico. De esta manera no habrá onda reflejada desde la terminación del tubo.

Dicho en otras palabras, se adaptara la impedancia acústica del parlante y circuito de derivación, de manera que sea igual a la del interior del tubo logrando que la onda no encuentre diferencia entre la impedancia del tubo y el parlante (un mismo medio).

### 3. Fundamentos teóricos del sonido

#### 3.1. Acústica

Para poder entender y trabajar sobre el sistema parlante - tubo, debemos entender prime-  
ramente los fundamentos teóricos de la acústica. Esta es la ciencia que estudia los aspectos  
relativos al sonido, es decir, ondas mecánicas que se propagan a través de la materia por medio  
de modelos físicos y matemáticos y las distintas aplicaciones tecnológicas.

A continuación, analizaremos un ejemplo en el cual tenemos un largo tubo con un pistón  
en uno de sus extremos como se observa en la figura 5.

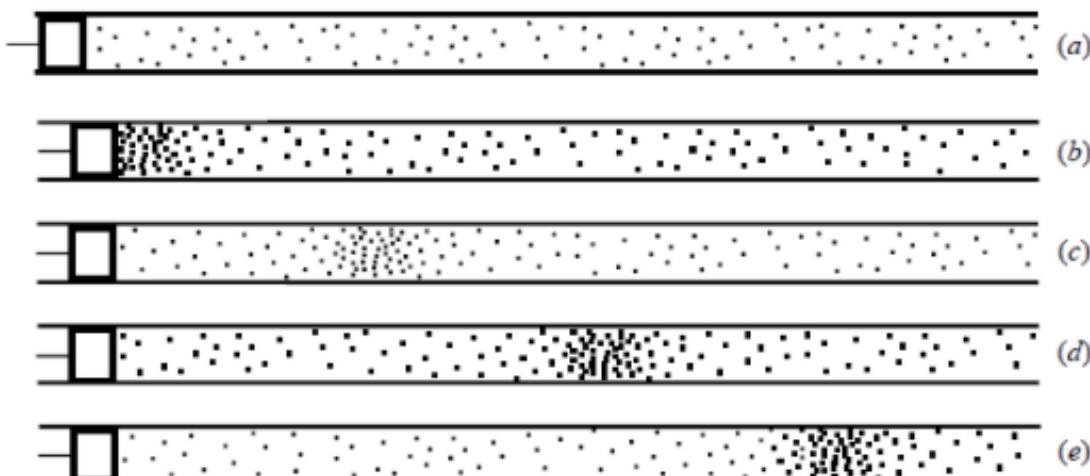


Figura 5: Propagación de una perturbación en un tubo.

Podemos observar en el estado inicial (a) el aire se encuentra en estado de equilibrio, con las moléculas en una distribución uniforme. Esto hace que la presión sea constante en todo el largo del tubo. En (b) el pistón avanza desplazando moléculas de aire en la dirección de su avance, comprimiendo el aire próximo a este. Esta sección está, obviamente, a una presión mayor a la de su entorno, y tiende por inercia a descomprimirse, aumentando la presión en la siguiente sección en relación al movimiento del pistón. De esta forma, la perturbación inicial se ha desplazado, como se observa en (c) . Este proceso se repite en las siguientes secciones, pero es importante destacar; que las partículas oscilan con un movimiento armónico simple y longitudinal; es decir, no se desplazan, la onda es la que se propaga alejándose de la fuente que generó la perturbación inicialmente. Ahora, si el pistón se mueve hacia adelante y atrás oscilando con un movimiento armónico simple, crea una onda sonora de frecuencia única desplazándose a través del aire, provocando en el aire una variación de presión sinusoidal. Como característica de las ondas longitudinales, el movimiento del aire que acompaña al paso de la onda de sonido, será adelante y atrás en la dirección de propagación del sonido.

En la figura 6 podemos ver una distribución espacial de las moléculas del aire cuando se las somete a cambios de presión debido a la interacción con una onda sonora

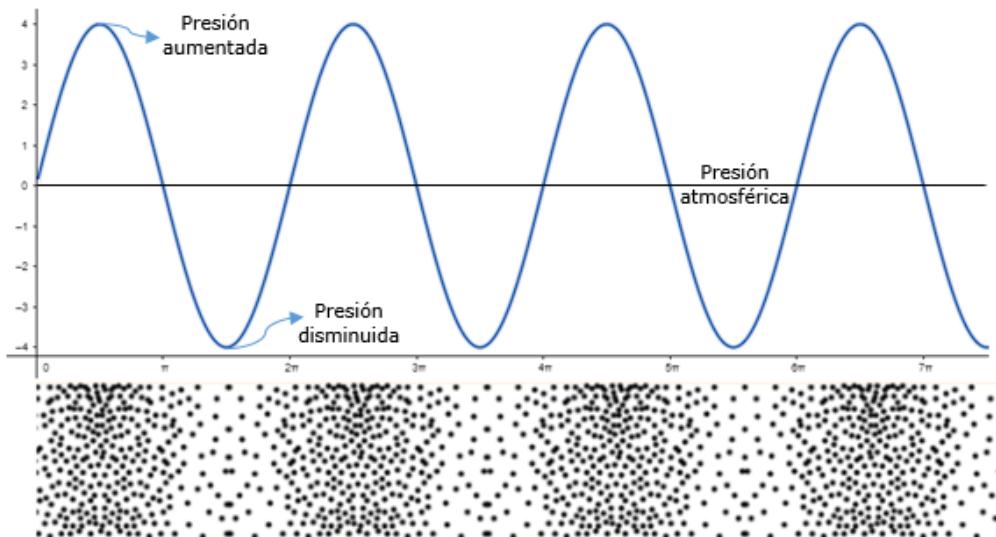


Figura 6: Ilustración gráfica de la distribución de las moléculas del aire sometidas a cambios de presión debido a una onda de sonido.

Ahora desarrollaremos matemáticamente los fundamentos teóricos que respaldan el comportamiento descrito en los párrafos anteriores.

Consideramos un tubo cilíndrico de sección transversal A cuya longitud sea infinita, y su presión sea igual en la totalidad del recinto  $P_0$  = Presión atmosférica. Luego, si tenemos una onda sonora senoidal que se desplaza dentro del tubo, la presión fluctúa por arriba y por debajo de la presión atmosférica en forma senoidal con la misma frecuencia que los movimientos de las partículas de aire.

Sea  $p(x, t)$  la fluctuación de presión instantánea en una onda sonora en cualquier punto  $x$  en el instante  $t$ . Es decir,  $p(x, t)$  es la cantidad en que la presión difiere de la presión de equilibrio  $P_0$ . Pensemos en  $p(x, t)$  como la presión manométrica, puede ser positiva o negativa. La presión absoluta en un punto es entonces  $P_0 + p(x, t)$ , con

$$p(x, t) = B.k.A.\operatorname{sen}(k.x - \omega.t + \phi) \quad (1)$$

siendo la ecuación que describe la presión del aire en un instante de tiempo y posición determinados con un desfase  $\phi$ . Luego, la amplitud de presión  $p_{\max}$  es directamente proporcional a la amplitud de desplazamiento  $A$ , el numero de onda  $k^2$ , y el modulo de volumen  $B$  del medio de la onda<sup>3</sup>

<sup>2</sup>El número de onda es una magnitud de frecuencia que indica el número de veces que vibra una onda en una unidad de distancia.

<sup>3</sup>En ondas longitudinales en fluidos la propiedad elástica que describe cómo responde el medio a cambios de presión con un cambio de volumen se denomina módulo volumétrico de elasticidad y se denota con la letra B.

### 3.2. Onda incidente y reflejada

La reflexión y la transmisión de las ondas ocurren cuando una onda que se propaga en un determinado medio se encuentra con una superficie de separación con otro medio. En general, podemos decir que una parte de la onda incidente, una parte de su energía, se refleja y otra se refracta.

A modo de ejemplificar, en la figura 7 veremos simplemente un pulso de onda transversal en una soga, teniendo en cuenta la analogía sonora, lo que ocurre cuando la onda se encuentra con distintos medios.

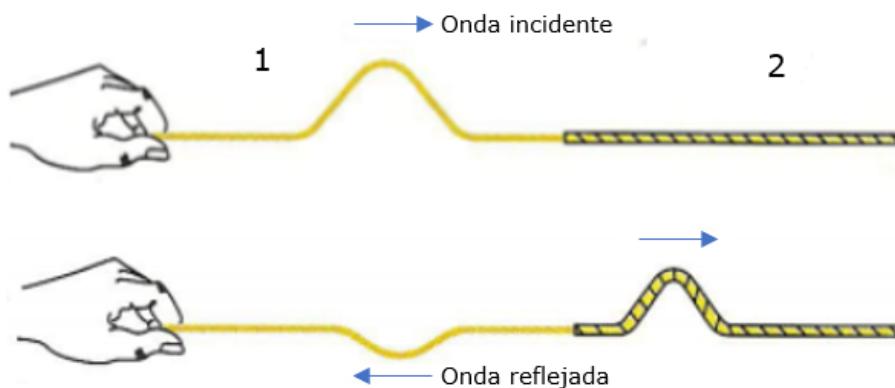


Figura 7: Propagación de una onda mecánica transversal en una cuerda con distintas impedancias, provocando su reflexión.

Esta misma, al ingresar en un medio con mayor impedancia (1 a 2), divide parte de su energía en una onda transmitida, la cual tiene menor amplitud, y otra parte en una onda reflejada, también de menor amplitud.

Si bien dentro del tubo una onda de sonido se propaga longitudinalmente, el efecto de reflexión por encontrar medios con distintas impedancias es análogo.

### 3.3. Modelo circuitual

En esta sección, haremos una analogía de los componentes del sistema acústico en relación al sistema eléctrico. La aplicación del concepto de circuito a la electroacústica, desarrollado a continuación, tiene la ventaja de llevar al lenguaje propio de la ingeniería electrónica el análisis de componentes y sistemas no eléctricos que interactúan con los bloques funcionales típicos del procesamiento electrónico, para poder simplificar y trabajar el sistema en un solo dominio.

Un sistema acústico está formado, en general, por una interconexión de conductos y cavidades de diversos tamaños y formas y por elementos porosos o celulares.

La idea de reemplazar estos elementos simples por componentes equivalentes utilizables en un circuito se enfrenta con la dificultad de que a causa del comportamiento ondulatorio del sonido el campo acústico no es uniforme. Sin embargo, cuando las dimensiones físicas de estos

componentes son mucho menores que la longitud de onda, es posible hacer una aproximación similar a la que se efectúa habitualmente en los circuitos eléctricos que permite realizar un tratamiento con parámetros concentrados. En el caso acústico convendrá seleccionar como una de las variables fundamentales la presión  $p$  y el caudal  $g$ .

En el sistema acústico, es de conveniencia utilizar la analogía

$$v \longleftrightarrow p \quad (2)$$

$$i \longleftrightarrow g \quad (3)$$

ya que en el caso de la presión se puede asimilar a la tensión, por entenderse de “caídas de presión”. En el caso de la corriente, se trata de un flujo de cargas eléctricas por un flujo de partículas en el caso de las ondas sonoras.

A continuación, los componentes equivalentes de acústica.

- Masa acústica: es una pequeña masa de aire capaz de desplazarse sin compresión apreciable. El caso más típico lo constituye el aire dentro de un pequeño tubo cuyas dimensiones son mucho menores que la longitud de onda sonora.

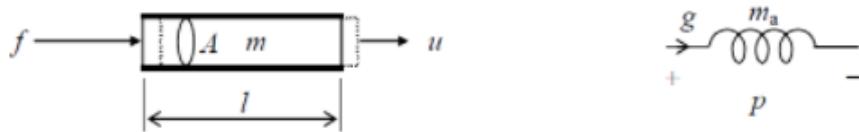


Figura 8: Equivalente circuitual correspondiente a la masa mecánica.

Como se muestra en la figura 8, su equivalente eléctrico es el de una inductancia y su ecuación queda determinada por

$$p(t) = \frac{m}{A^2} g'(t) \quad (4)$$

donde  $p(t)$  es la tensión,  $g'(t)$  la derivada de la corriente y  $m$  es la bobina. Y en el dominio acústico,  $f(t)$  es la presión existente [ $\equiv p(t)$ ] en el extremo del tubo multiplicada por el área  $A$ ,  $u(t)$  es la velocidad del la masa de aire [ $\equiv g(t)$ ] y  $m$  es la masa en si.

- Compliancia acústica: Una compliancia acústica es una pequeña masa de aire capaz de comprimirse o expandirse sin desplazamiento apreciable. Un caso típico es el aire dentro de un pequeño tubo cerrado en un extremo.



Figura 9: Equivalente circuital correspondiente a la compliancia acústica.

Como se muestra en la figura 9, su equivalente eléctrico, es el de un capacitor y su ecuación característica es

$$p(t) = \frac{\rho_0 \cdot c^2}{V} \int g(t) dt \quad (5)$$

Podemos ver claramente que esta ecuación es análoga a la de un capacitor eléctrico donde  $\rho_0$  es la densidad característica del aire,  $c$  es la velocidad del sonido,  $V$  el volumen del recinto y  $g(t)$  es el caudal en función del tiempo. Si tenemos en cuenta las analogías presentadas en las ecuaciones 2 y 3 podemos extender nuestro modelo acústico a un modelo eléctrico.

- Resistencia acústica: La resistencia acústica es el resultado de la presencia de una fricción viscosa interpuesta en el recorrido de la onda sonora.

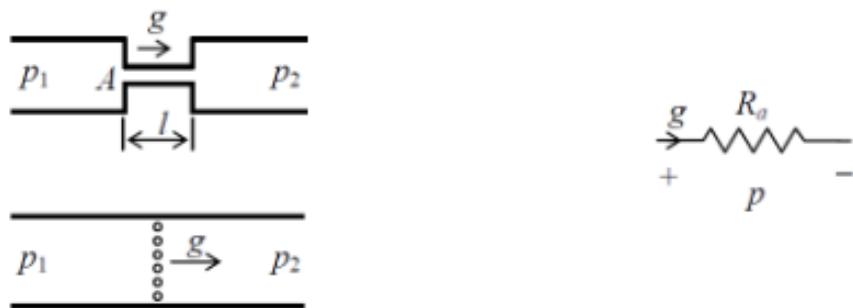


Figura 10: Equivalente circuital correspondiente a la resistencia acústica.

El equivalente eléctrico que podemos ver en la figura 10 es la resistencia y cumple con la ley de Ohm:

$$g(t) = \frac{p(t)}{R_a} \quad (6)$$

- Impedancia acústica: Los componentes acústicos quedan caracterizados entonces por su impedancia acústica igual que en los casos eléctrico y mecánico, el concepto de impedancia puede generalizar para cualquier combinación de estos componentes, como veremos luego. Cada medio tiene una impedancia acústica propia, lo que provoca que la velocidad de propagación de la onda también sea propia del medio. Habiendo dicho esto, podemos definir a la impedancia acústica específica como el cociente entre la presión  $P$  y la velocidad  $G$

$$Z_a(s) = \frac{P(s)}{G(s)} \quad (7)$$

### 3.4. Equivalente electromecánico

En la figura 11 podemos ver una representación gráfica de un sistema altavoz-tubo, donde la cara posterior del altavoz está encerrada en un recinto de volumen  $V$ , y una cara frontal que irradia en una guía de onda de sección circular igual al área efectiva del transductor (altavoz). Vemos además que la terminación de la guía de ondas es anechoica<sup>4</sup>.

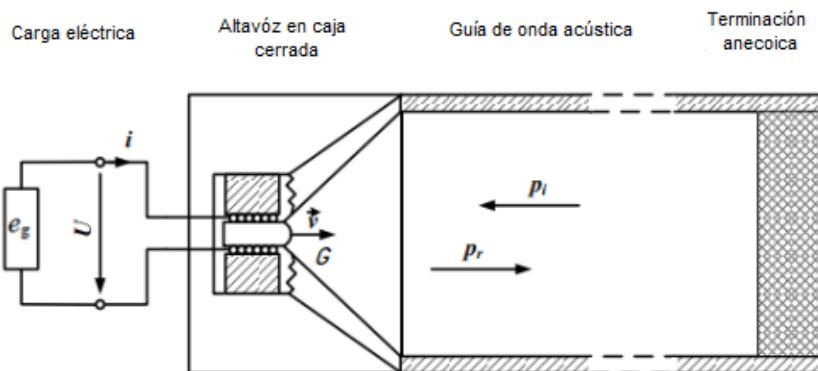


Figura 11: Representación gráfica de un sistema altavoz-tubo.

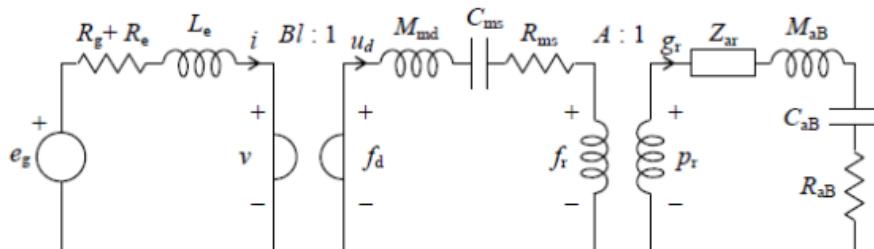


Figura 12: Esquema circuital de un sistema altavoz-tubo.

Pasaremos a explicar los componentes del circuito de la figura 12

<sup>4</sup>Propiedad estructural o intrínseca del material de absorber la onda sonora sin reflejar.

En la primera etapa vemos en serie 2 resistencias ( $R_g$  y  $R_e$ ) también en serie con una bobina  $L_e$  y una fuente  $e_g$ . Modelamos  $R_g$  y  $e_g$  como la resistencia y la tensión entregada por la fuente de señal que excita nuestro altavoz. Luego,  $R_e$  y  $L_e$  son la resistencia e inductancia propias de la bobina del altavoz respectivamente. Vemos una caída de tensión  $v$  debido al girador, que representa la transducción electro magneto mecánica que se da en las bobinas del altavoz, cuya constante de conversión es  $Bl$ , parámetro brindado por el fabricante.

En la segunda etapa vemos un inductor, un capacitor y una resistencia. Estos componentes representan la masa del cono, la compliancia mecánica de las suspensiones y las pérdidas mecánicas de las suspensiones, respectivamente. Estos componentes están en serie ya que comparten flujo, la velocidad  $v$  en este caso. También en serie vemos otro inductor, este mismo es parte del transformador, representando la transformación mecano acústica. Vemos que el secundario del transformador forma parte de la tercera etapa. En la tercera etapa, tenemos en serie la impedancia  $Z_{ar}$ , que representa la masa acústica del tubo y la inductancia  $M_{aB}$ , la compliancia acústica  $C_{aB}$  del interior del bafle y se disipa parte del caudal en la resistencia  $R_{aB}$ .

## 4. Métodos posibles de resolución

El ruido se puede controlar por métodos pasivos y/o activos. Los métodos de control pasivo no añaden energía adicional al sistema, por lo que son intrínsecamente estables. Pueden absorber energía o modificar la impedancia del medio para reducir el campo acústico propagado en el mismo. Los métodos pasivos incluyen absorbentes superficiales, silenciadores reactivos, materiales porosos, soportes antivibratorios, resonadores, entre otros.

### 4.1. Control pasivo

Las técnicas pasivas se encuentran en un estado muy maduro, y proporcionan soluciones efectivas a frecuencias medias y altas, con un coste no excesivamente elevado. La envergadura del dispositivo de control (tamaño y peso) está relacionada con la longitud de onda del ruido a cancelar. Esto hace que los dispositivos pasivos, por debajo de una cierta frecuencia, sean poco rentables o inviables.

Hablamos de un método pasivo cuando nos referimos a alguna característica constitutiva del dispositivo. Un método pasivo será aquel capaz de absorber una onda acústica por sus propios medios, mientras que un método activo tendremos que ir modificando sus características para que la absorción sea efectiva.

Algunos de estos métodos de control pasivo son:

- Materiales porosos: Se trata de materiales formados por fibras o por estructuras cavernosas que dejan entre sí espacios que son alcanzados por las moléculas de aire. Actúan por rozamiento de las moléculas de aire con las del material, produciendo la disipación de la energía de las ondas sonoras que se transforma en calor.
- Resonadores: Existen distintos tipos de resonadores, aunque los más comunes son el resonador de Helmholtz y la membrana resonante. La membrana resonante convierte la energía sonora en mecánica como resultado de las deformaciones ondulatorias de un panel al ser excitado por el sonido incidente. El resonador de Helmholtz es un volumen de aire contenido en una cavidad con al menos una abertura. El aire que hay en el cuello de la abertura se comporta como una masa y el aire que hay en la cavidad se comporta como un muelle, de manera que constituye el elemento de rigidez. Estos dos elementos (muelle-masa) dan lugar a un sistema resonante, que presentará un pico de absorción en dicha frecuencia de resonancia En la figura 13 se observan los distintos materiales y sus respectivas absorciones en frecuencia.

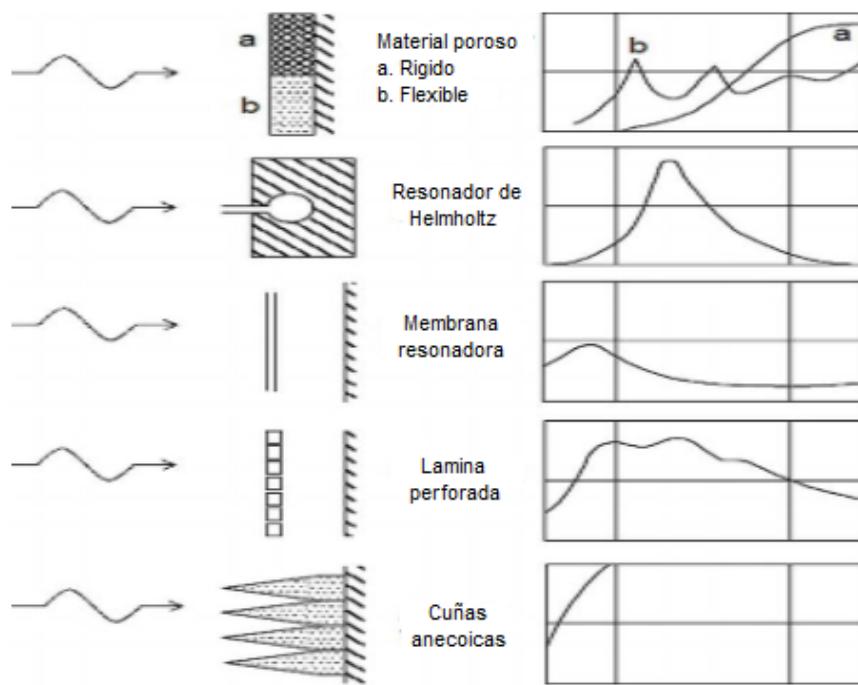


Figura 13: Tipos de absorbentes acústicos y sus curvas de performance.

## 4.2. Control activo

El control activo del ruido es una tecnología emergente, que combina fundamentos de acústica, electrónica y procesado de señal, proporcionando soluciones viables al problema del ruido de baja frecuencia. Además, los sistemas activos se integran bien con diseños pasivos para ofrecer soluciones híbridas de banda ancha

Los sistemas de control activo del ruido constan de una parte acústica, de un hardware y de un software de control. El software consta de un programa de control que adquiere las señales de entrada, las procesa y calcula las señales de salida. Por tanto, el control activo es un sistema asistido por ordenador.

En otras palabras, hablamos de un método activo cuando este implica un seguimiento o control de algún determinado dispositivo, mediante el suministro de energía al sistema, y hacer que el mismo cambie sus características para lograr una correcta absorción.

A continuación, se listan algunos ejemplos de estos controles.

- **Cancelación acústica (ANC):** Consiste en eliminar “sonido con sonido” mediante interferencia destructiva entre la fuente original del sonido y una segunda fuente controlada en desfase, produciendo una disminución de la potencia radiada. Podemos ver un esquema de su funcionamiento en la figura 14
- **Sistema piezoeléctrico de derivación (PSD):** El concepto principal consiste en la transformación de la energía de deformación dinámica de la estructura del elemento que se

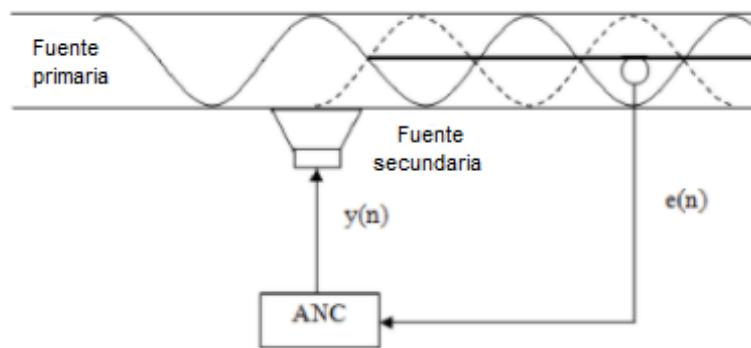


Figura 14: Esquema simplificado de control de cancelación acústica.

encuentre vibrando debido a la interacción con una onda sonora en energía eléctrica. Esto se logra mediante el uso del efecto piezoeléctrico directo y el enrutamiento de esta energía al circuito de derivación donde se puede consumir parcialmente. De esta manera, la energía que se consume parcialmente es la de la onda, siendo así absorbida por el elemento piezoeléctrico. Podemos ver una representación de este tipo de sistemas en la figura 15

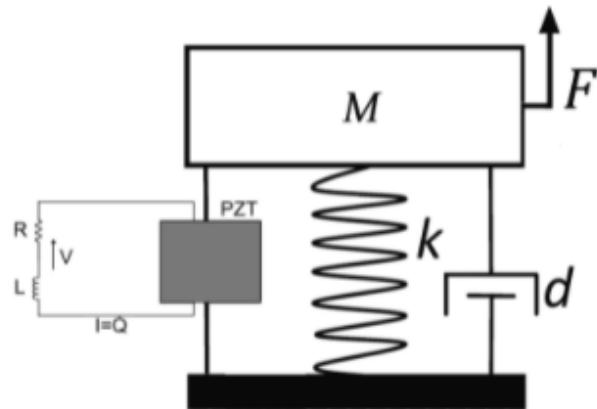


Figura 15: Representación gráfica de un sistema piezoeléctrico de derivación.

## 5. Método propuesto

### 5.1. Método de amortiguación de derivación electromagnética

Para lograr absorber la onda incidente, se aplicará el método de amortiguación de derivación electromagnética. Está basado en el control activo de la impedancia acústica del parlante que está situado en la terminación del tubo acústico, como se observa en la figura 16.

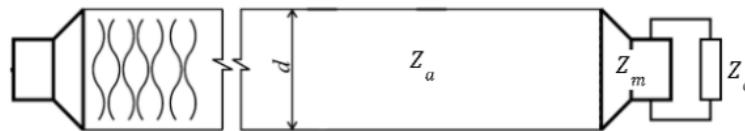


Figura 16: Representación gráfica del sistema altavoz-tubo-adaptador de impedancia.

Este problema ya ha sido abordado anteriormente en diversas oportunidades y con diversas propuestas. Si bien se prefiere que la propuesta sea pasiva, se han realizado estudios con control activo del sonido.

Hablamos de circuito activo debido a que es necesario ir adaptando la impedancia acústica que presenta el parlante, esto es así ya que la impedancia acústica a la que es sometida la onda varía según la frecuencia de la misma.

Podemos ver en la figura 17 un esquema simplificado de cómo se vería la conexión de nuestro sistema altavoz - circuito de derivación para poder darnos una idea del funcionamiento del mismo. En este caso, el movimiento del diafragma debido al choque con las ondas sonoras provocará asimismo un movimiento de la bobina móvil dentro del campo magnético generado por el imán, induciendo una fuerza electromotriz por la bobina la cual será la señal que reciba el AO.

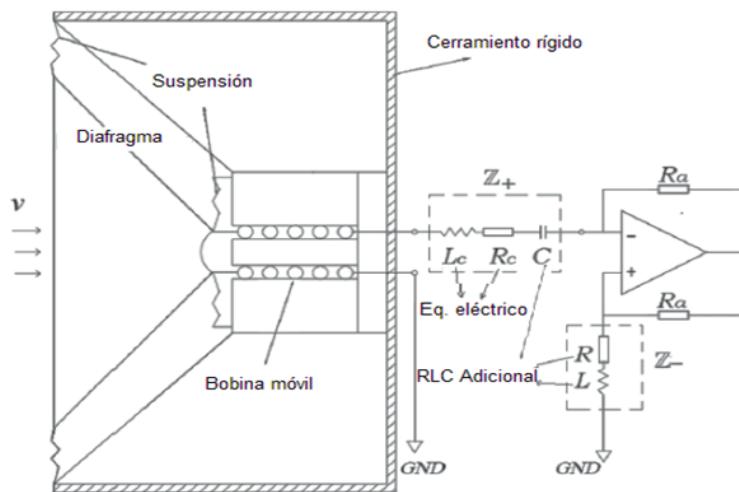


Figura 17: Esquema simplificado de la conexión altavoz - circuito de derivación.

Haciendo que la impedancia acústica del circuito de amortiguación, mediante un convertidor de impedancia negativa, alcance el mismo valor de impedancia acústica del tubo, lograremos que la onda incidente acústica sea totalmente absorbida ya que la onda no vería diferencia alguna entre propagarse en el tubo y propagarse a través del parlante logrando que esta no se vea reflejada.

## 5.2. Equivalente eléctrico del circuito

Ahora el objetivo es determinar el valor apropiado de la impedancia del circuito de derivación. Para esto, es necesario saber el valor de la impedancia total del parlante, eléctrica y mecánica, haciendo un circuito equivalente del mismo, como ya fue explicado previamente en los fundamentos teóricos del sonido.

Haciendo hincapié en que la impedancia del tubo tiene que ser igual a la impedancia acústica del circuito de amortiguación conformada por el equivalente mecánico y eléctrico, basándonos en la figura 16 podemos plantear la ecuación 8.

$$Z_{\text{acústica}} = Z_{\text{mecánica}} + Z_{\text{eléctrica}} \quad (8)$$

Si desarrollamos un poco mas la ecuación 8 podemos obtener la expresión que se muestra en la ecuación 9

$$(R_{ab} + \frac{1}{j\omega C_{ab}} + j\omega M_{ab}) \cdot S^2 = R_{ms} + \frac{1}{j\omega C_{ms}} + j\omega M_{ms} + \frac{(Bl)^2}{j\omega L_e + R_g + R_e + Z_{cd}} \quad (9)$$

Este es el caso ideal, donde la impedancia acústica del tubo es igual a la impedancia total (suma entre mecánica y eléctrica) del altavoz, logrando así que la onda sea absorbida.

Ahora, lo que nos interesa es averiguar es el valor de impedancia del circuito derivador, esto lo podemos obtener despejando de la ecuación 9 el término  $Z_{cd}$

$$Z_{cd} = \frac{(Bl)^2}{[(R_{ab} + \frac{1}{j\omega C_{ab}} + j\omega M_{ab}) \cdot S^2 - (R_{ms} + \frac{1}{j\omega C_{ms}} + j\omega M_{ms})]} - (j\omega L_e + R_g + R_e)(Z_{ar} \cdot S^2) \quad (10)$$

Todos los términos de la ecuación anterior quedan definidos por las características constructivas y constitutivas de los elementos que interactúan con la onda sonora que se desplaza dentro del tubo. Del lado del altavoz tenemos los parámetros brindados por el fabricante. Por otro lado, tenemos las características propias del aire, como la inercia, compliancia y resistencia acústica. A continuación, en las figuras 18 y 19, podremos ver el equivalente eléctrico de nuestro sistema.

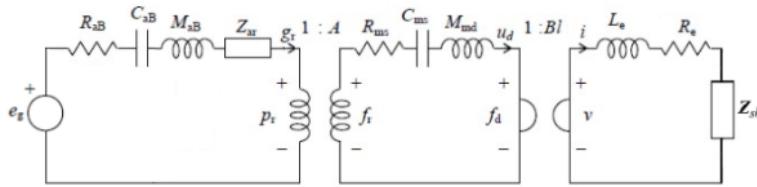


Figura 18: Equivalente eléctrico del sistema onda-tubo-parlante-circuito de derivación indicando los cambios de medio con un transformador (acústico-mecánico) y un girador (mecánico-eléctrico).

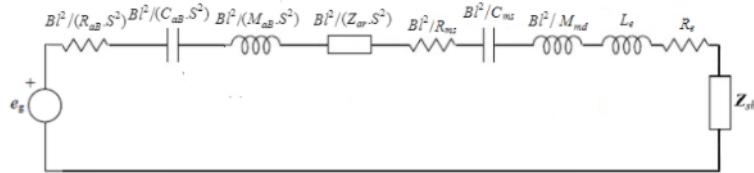


Figura 19: Equivalente eléctrico del sistema onda-tubo-parlante-circuito de derivación en el dominio eléctrico.

## 6. Escenario experimental

Para lograr corroborar el correcto desempeño del dispositivo, es decir que las ondas sonoras serían absorbidas completamente por el mismo, emplearemos un método ya estandarizado que se describe en la norma ISO 10534-2, donde se emplean 2 micrófonos y se calcula la función transferencia entre ambos micrófonos con motivo de calcular el coeficiente de reflexión. Cada uno de ellos está ubicado a distintas distancias con respecto al altavoz conectado al circuito derivador como se ve en la figura 20. Esto es así con el motivo de poder calcular la función transferencia entre ambos micrófonos.

La disposición experimental será algo similar a lo que se ve en la figura 20, donde podemos distinguir claramente un altavoz generador de ondas, los 2 micrófonos los cuales serán utilizados para medir la reflexión de la onda acústica, y el altavoz receptor de ondas.

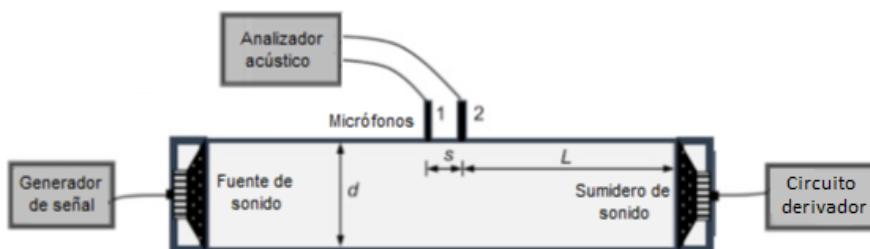


Figura 20: Disposición de los elementos del sistema.

$$\tilde{R}(\omega) = \frac{(\tilde{H}_{12}(\omega) - e^{-jks})}{(e^{jks} - \tilde{H}_{12}(\omega))} \cdot e^{2jk(s+L)} \quad (11)$$

donde  $k = \frac{2\pi\omega}{c}$  es el número de onda,  $c$  es la velocidad del sonido en el aire,  $\omega$  es la frecuencia de la onda y  $j = \sqrt{(-1)}$

Utilizando este coeficiente de reflexión se puede determinar el coeficiente de absorción del sonido utilizando la siguiente ecuación:

$$\alpha(\omega) = 1 - \left| \tilde{R}(\omega) \right|^2 \quad (12)$$

## 6.1. Fundamentos teóricos

Los fundamentos teóricos utilizados en el desarrollo de este proyecto pueden ser encontrados, como se mencionó anteriormente, en la normativa Española UNE-EN ISO 10534. Esta normativa describe con exactitud cada aspecto a tener en cuenta a la hora de medir el coeficiente de reflexión de una onda de sonido utilizando el método de los dos micrófonos.

Este método de medición se basa en el hecho que el coeficiente de reflexión  $r$  puede ser determinado a través de la función transferencia entre dos micrófonos.

Ahora bien, sabemos que la presión sonora de una onda incidente  $p_i$  y de una onda reflejada  $p_r$  serán:

$$p_i = \hat{p}_i e^{jk_0 x} ; p_r = \hat{p}_r e^{-jk_0 x} \quad (13)$$

donde  $\hat{p}_i$  y  $\hat{p}_r$  son las magnitudes  $p_i$  y  $p_r$  en el plano de referencia ( $x=0$ ) y  $k_0 = k_0' - jk_0''$   
Luego, la presión sonora en la posición  $p_1$  y en la posición  $p_2$  están dadas por:

$$p_1 = \hat{p}_i e^{jk_0 x_1} + \hat{p}_r e^{-jk_0 x_1} \quad (14)$$

$$p_2 = \hat{p}_i e^{jk_0 x_2} + \hat{p}_r e^{-jk_0 x_2} \quad (15)$$

La función transferencia de la onda incidente sola será:

$$H_i = \frac{p_{2i}}{p_{1i}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{-jk_0 s} \quad (16)$$

donde  $s = x_1 - x_2$

De manera análoga podemos plantear la función transferencia de la onda reflejada y esta será:

$$H_r = \frac{p_{2r}}{p_{1r}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{-k_0 s} \quad (17)$$

Por último, la función transferencia  $H_{12}$  entre el micrófono en la posición 1 y el micrófono en la posición 2 quedará determinada por el cociente entre las presiones captadas por los micrófonos en esos puntos y teniendo en consideración que  $\hat{p}_r = r\hat{p}_i$  entonces utilizando las ecuaciones 14 y 15

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0x_2} + re^{-jk_0x_2}}{e^{jk_0x_1} + re^{-jk_0x_1}} \quad (18)$$

Como nuestro objetivo es el cálculo del coeficiente de reflexión  $r$ , haciendo uso de las ecuaciones 16, 17 y la ecuación 18 obtenemos como resultado la ecuación 19

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (19)$$

De esta manera vemos que como podemos determinar el coeficiente de reflexión mediante la obtención de la función transferencia entre 2 micrófonos ubicados en un tubo.

## 7. Medición del coeficiente de reflexión en tiempo real

### 7.1. Hardware

El sistema de procesamiento de señal consta de 2 micrófonos y un pre-amplificador, el cual es el encargado de tomar la señal analógica de los micrófonos y pre-amplificarla. Además contamos con una placa de audio la cual dispone dos canales de entrada para poder convertir ambas señales analógicas provenientes de los micrófonos en señales digitales. Posteriormente, estas señales digitales son procesadas por una PC la cual corre un código de Python, donde se calcula y se muestra en pantalla el coeficiente de reflexión graficando este mismo para cada frecuencia.

Por otra parte, el sistema de propagación de ondas esta constituido por una fuente de sonido (altavoz), ubicado en un extremo del tubo el cual es el encargado de guiar la onda unidireccionalmente.

#### 7.1.1. Tubo Acústico

El tubo deberá ser del largo suficiente que cause el desarrollo de ondas planas entre la fuente de sonido y el receptor. El muestreo de los micrófonos deberá estar en el campo de onda plana, esto es así ya que a una distancia de aproximadamente 3 diámetros de tubo, existen modos no planos. Por este motivo, la normativa española establece que los micrófonos se encuentren alejados de la fuente de sonido y preferentemente cerca del encargado de absorber la onda para así poder concretar el chequeo de la reflexión.

En nuestro caso, el tubo con el que trabajamos es de hierro y tiene una longitud  $L = (1,81 \pm 0,01)m$ . Cuenta con un diámetro exterior de  $d = (10 \pm 0,1)cm$  y un espesor de  $e = (1,5 \pm 0,05)mm$ .

El rango de frecuencia posibles a medir queda determinado por la longitud del tubo con el cual estemos trabajando por lo que podemos decir que:

$$f_{\text{inf}} < f < f_{\text{sup}} \quad (20)$$

donde  $f_{\text{inf}}$  es la frecuencia inferior de trabajo del tubo,  $f$  es la frecuencia de operación y  $f_{\text{sup}}$  es la frecuencia superior.

Ahora, esta frecuencia inferior estará limitada por aquella longitud de onda la cual es tan grande que la diferencia de presión en los micrófonos es despreciable siendo la misma:

$$f_{\text{inf}} > 0,05 \frac{c_0}{L} \quad (21)$$

Por otra parte, la frecuencia superior es elegida para evitar la propagación de ondas sonoras no planas, esto es así ya que para determinada longitud de onda deberíamos comenzar a tener en

cuenta un  $k_0$  complejo. Entonces  $f_{\text{sup}}$  quedará determinada, para tubos circulares como es en nuestro caso, por la siguiente ecuación:

$$f_{\text{sup}} < 0,45 \frac{c_0}{L} \quad (22)$$

Luego, la distancia entre micrófonos  $s$  estará en el rango:

$$f_{\text{sup}} \cdot s < 0,45 c_0 \quad (23)$$

Todas estas ecuaciones se obtienen de la norma ISO 10345-2, la cual estandariza la medición del coeficiente de reflexión en un tubo con el método de los dos micrófonos como se mencionó anteriormente.

### 7.1.2. Micrófonos

Los micrófonos que serán usados deben ser del mismo tipo. Cuando se utilicen micrófonos montados en el tubo, el diámetro de los mismos deberá ser menor comparado con  $c_0/f_{\text{sup}}$ . Además se recomienda que el diámetro de los micrófonos sea menor que el 20 % del espacio entre ellos.

Nos encontramos con la disyuntiva de utilizar micrófonos unidireccionales u omnidireccionales. Para esta aplicación en particular hubiera sido una mejor opción utilizar micrófonos unidireccionales ya que solo nos interesa muestrear el sonido existente en el interior del tubo de impedancias. De todas maneras se decidió trabajar con micrófonos omnidireccionales debido a su bajo costo y su practicidad para emplearlos en esta aplicación. El único problema que nos traerá el uso de micrófonos omnidireccionales será que, al momento de realizar el muestreo de la señal se deberá buscar el mayor silencio posible dentro de la sala de estudio. En la figura 21 pueden verse los micrófonos utilizados para captar la señal.

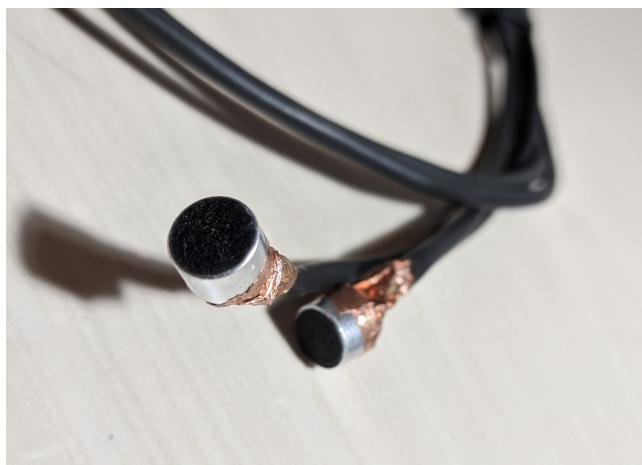


Figura 21: Micrófonos ubicados en el tubo.

Cuando se hace uso de micrófonos montados en el tubo, la correcta colocación de los mismos

es con el diafragma al ras con la superficie interior del tubo tal y como se muestra en la figura 22

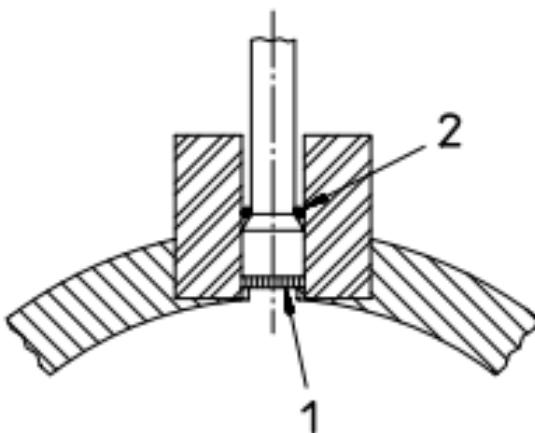


Figura 22: Micrófono montado en tubo.

### 7.1.3. Pre-amplificador

En un principio, habíamos diseñado un esquemático del circuito (figura 25) así como también un PCB<sup>5</sup> pero debido a que es un producto que se encuentra fácilmente en cualquier casa de audio o en páginas de internet sumado a que su costo no es elevado hemos optado por comprarlo. El pre-amplificador que hemos utilizado es uno que hemos adquirido en un sitio web. El mismo es un módulo conformado por un NE-5532. En la figura 23 se muestra el módulo adquirido.



Figura 23: Circuito pre-amplificador de audio estéreo.

Para poder hacer uso de la señal de los micrófonos se soldaron los bornes de ambas cápsulas a un conector jack de 6.5mm estéreo como se muestra en la figura 24

<sup>5</sup>Un PCB es una superficie constituida por caminos, pistas o buses de material conductor laminadas sobre una base no conductora. El circuito impreso se utiliza para conectar eléctricamente a través de las pistas conductoras, y sostener mecánicamente, por medio de la base, un conjunto de componentes electrónicos.



Figura 24: Cápsulas soldadas a un conector jack de 6.5mm.

El pre-amplificador toma la señal de estos micrófonos a través de los bornes IN-L y IN-R y la amplifica hacia los bornes de salida OUT-L y OUT-R. Esta ultima será la señal que tome nuestra placa de audio para convertir la información analógica en información digital.

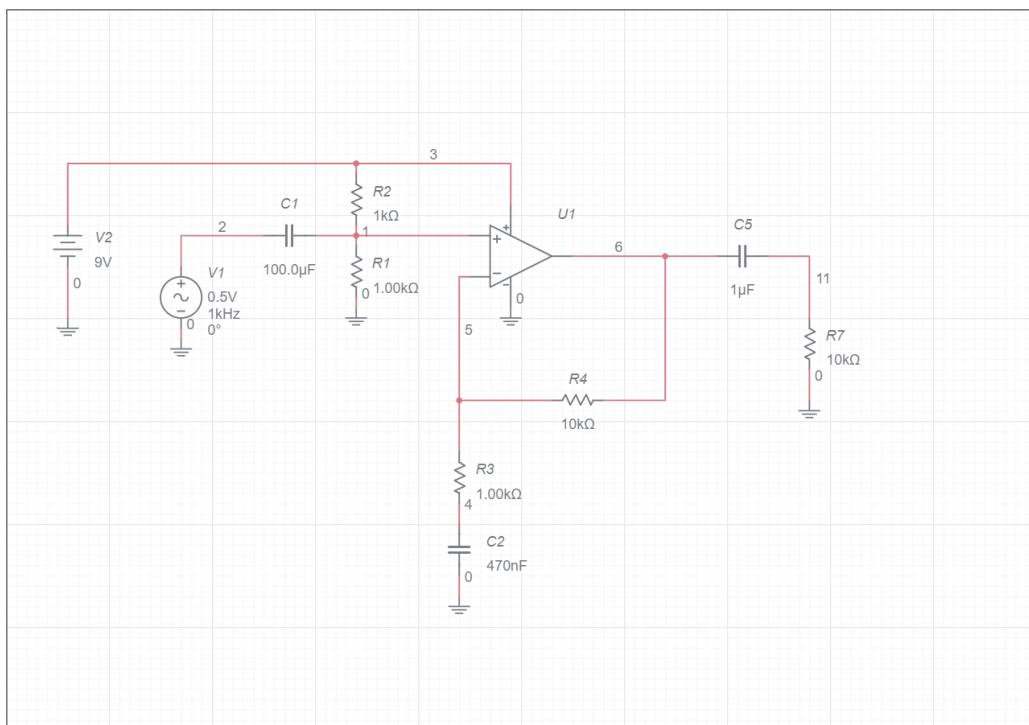


Figura 25: Esquemático del circuito amplificador.

#### 7.1.4. Altavoz

El altavoz con el que trabajamos es un altavoz Full-Energy 4”, 8Ω y 70W de potencia. El mismo se muestra en la figura 26. Este altavoz es el encargado de reproducir el sonido que luego se propagará a lo largo del tubo de impedancias para poder calcular el coeficiente de reflexión. Por esta razón no es necesario disponer de los parámetros característicos del mismo ya que no son relevantes en la aplicación. Éste altavoz es uno que ya había en existencia en el Instituto de Física de Rosario (IFIR).



Figura 26: Altavoz emisor de sonido.

### 7.1.5. Interfaz de audio

La placa de audio que utilizamos es una Behringer U-Control UCA222 como la que se muestra en la figura 27. Ésta placa de audio es la encargada de convertir la señal analógica en señal digital. La misma cuenta con 2 canales de audio mono de entrada lo cual satisface nuestra necesidad de 1 canal por micrófono. Además cuenta con 2 canales de salida, también mono, pero no son de utilidad en esta aplicación ya que utilizamos la salida digital. La placa se conecta a la PC vía USB lo cual nos permite poder hacer uso de los datos digitales en nuestro programa para poder hacer el cálculo del coeficiente de reflexión.



Figura 27: Placa de audio Behringer U-Control UCA222.

### 7.1.6. PC

La señal brindada por los micrófonos ubicados en la superficie del tubo ya fue pre-amplificada, convertida de analógica a digital y ahora solo resta ser utilizada por un micro-procesador con el objetivo de poder obtener un valor coherente de coeficiente de reflexión. El objetivo de usar un micro-procesador es poder correr un algoritmo el cual sea capaz de convertir esa información digital en resultados gráficos con la finalidad de facilitar la comprensión. Para lograr esto se podrían haber utilizado diversos dispositivos tales como una Raspberry Pi, un sistema embedido, entre otros. Pero en nuestro caso particular decidimos utilizar una PC, esto es así ya que en el laboratorio de física ya contamos con la disponibilidad de una lo cual nos ahorra el tener que gastar dinero en otro dispositivo para el procesamiento. Para lograr representar de manera gráfica el valor del coeficiente de reflexión para un rango de frecuencias fue necesario hacer uso de un sistema operativo, entorno de desarrollo y un lenguaje de programación. En la siguiente sección se hablará con mayor detalle sobre el software.

## 7.2. Software

### 7.2.1. Windows 10

Como todos conocen Windows 10 es un SO, de las siglas *Sistema Operativo*, el cual es necesario para instalar programas tales como los que se comentan a continuación. Se hace mención de Windows 10 ya que es necesario disponer de esta versión para instalar la última versión de Python y PyCharm con el propósito de poder disponer de las ultimas versiones de las librerías de terceros disponibles para la comunidad. No se trata de desarrollar el código en otro sistema operativo ya que la idea es que su uso sea posible en las PCs de la facultad en las cuales la gran mayoría tienen instalado Windows 10.

### 7.2.2. Python

Python es un lenguaje de programación amigable e intuitivo con la capacidad de integrar diferentes sistemas de manera sencilla.

Está desarrollado bajo una licencia de código abierto aprobada por OSI<sup>6</sup>, lo que lo hace de libre uso y distribución, incluso para uso comercial.

Se opta por utilizar Python debido a la gran facilidad y practicidad de desarrollo que tiene el lenguaje. No esta demás aclarar que otro de los motivos es la gran cantidad de aplicaciones, módulos y librerías de terceros en existencia así como también las contribuciones de la comunidad de Python abriendo las puertas a infinitas posibilidades.

### 7.2.3. PyCharm

Para poder hacer desarrollo en Python es necesario contar con un IDE<sup>7</sup>, de las siglas *Integrated Development Environment*. Al instalar el interprete<sup>8</sup> Python en nuestra PC se instala también un programa llamado IDLE<sup>9</sup>, de las siglas *Integrated Development and Learning Environment*, el cual nos permite programar en el lenguaje Python. De todas maneras, este entorno de desarrollo es básico por lo que se opta por instalar PyCharm debido a su practicidad a la hora de instalar librerías y realizar el desarrollo del código. Éste también es un software de código abierto.

---

<sup>6</sup>Open Source Initiative, es una corporación benéfica de California que otorga licencia de código abierto tras un proceso de revisión indicando que el software puede ser usado libremente, modificado y compartido.

<sup>7</sup>Es una aplicación informática que proporciona servicios integrales para facilitarle al desarrollador o programador el desarrollo de software.

<sup>8</sup>Es un programa que ejecuta directamente las instrucciones escritas en un lenguaje de programación dado

<sup>9</sup>Es un entorno de desarrollo integrado para Python, que se incluye con la instalación predeterminada del lenguaje desde hace varias versiones.

#### 7.2.4. Programa de medición

##### 7.2.4.1. Librerías utilizadas

El código utilizado se encuentra en el anexo 11.1.

A continuación, haremos un listado de las librerías mas importantes utilizadas y sus principales funciones:

- numpy: Esta es una librería que proporciona un objeto de matriz de elementos homogéneos arbitrarios, operaciones matemáticas rápidas sobre arreglos, y operaciones de Álgebra lineal, transformadas de Fourier, generación de números aleatorios, etc. En nuestro caso, la utilizamos para convertir datos de audio en un formato adecuado para la transformada de Fourier, creamos dos arreglos con números aleatorios y otros cuatro con valores de frecuencias específicos, a utilizar para el Plot de las funciones.
- matplotlib: Es una librería basada en la interfaz de MATLAB para plotear de manera similar. En especial utilizamos la función pyplot la cual actualiza una figura ya existente para ir ploteando en tiempo real y no crear una figura nueva cada vez que ingresan datos nuevos.
- scipy: Este es un paquete científico para Python, en nuestro caso, solo hacemos uso de la función FFT (transformada discreta de fourier) y FFTShift, la cual hace un corrimiento en el eje para poder plotear correctamente. Cabe aclarar que la librería numpy también disponía de esta función, pero scipy dispone de una mejor calidad a la hora de hacer la transformada.
- pyaudio: PyAudio proporciona enlaces de Python para PortAudio, la multiplataforma biblioteca de E/S de audio. Con PyAudio, puede usar fácilmente Python para reproducir y grabar audio en una variedad de plataformas. En nuestro programa, específicamente la utilizamos para usar formatos de variables ya definidos en la misma librería, obtener el listado de dispositivos de audio de la computadora en uso, y lo mas importante, obtener los datos de la señal del micrófono en tiempo real, en un formato compatible con python.
- PyQt5: PyQt5 es una librería que nos facilita el diseño de una GUI<sup>10</sup> para poder cargar y seleccionar distintos parámetros que deseemos utilizar a la hora de correr nuestro programa. Con la misma se pueden generar entradas/salidas de texto, imágenes, botones, pestañas, entre otras cosas. Todas estas herramientas hacen posible un diseño amigable para el usuario de la aplicación.

---

<sup>10</sup>La interfaz gráfica de usuario, conocida también como GUI, es un programa informático que actúa de interfaz de usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz.

**7.2.4.2. Interfaz** En la figura 28 se mostrará la interfaz del programa. Este mismo es corrido mediante un ejecutable, y este es el encargado de instalar las librerías necesarias y correr el código.

En la interfaz, primeramente se deberá seleccionar el dispositivo de entrada de audio. Esto es así, ya que cada computadora tiene una lista interna distinta de los dispositivos siendo entonces este, un valor dinámico para el código.

Se podrá seleccionar un rango de ploteo teniendo como mínimo 300 Hz y máximo 1000 Hz. Estos son los valores en el cual la medición tiene un correcto funcionamiento y están validados mediante el código.

Luego se podrá seleccionar si se desea plotear el coeficiente de reflexión o absorción del material a medir.

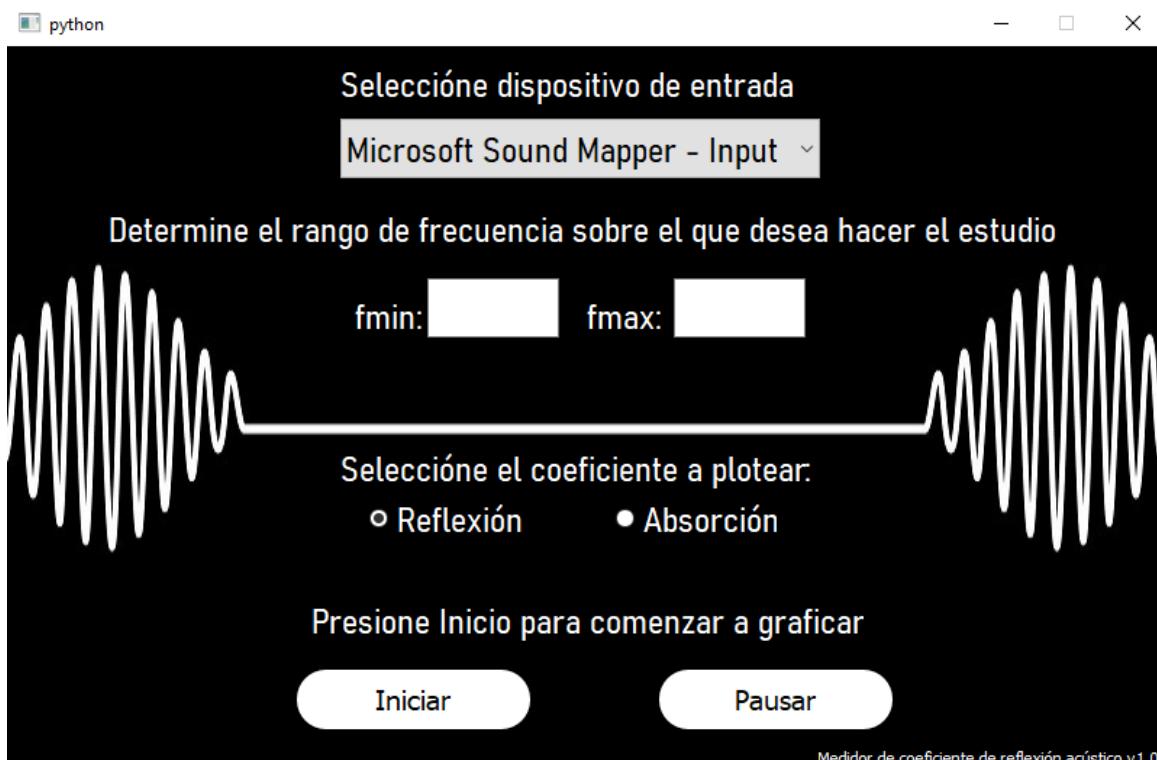


Figura 28: Interfaz Medidor de coeficiente de reflexión acústico.

Una vez que inicia el programa, se abre otra ventana con los parámetros seleccionados para el plot. Este mismo esta compuesto por dos subplots, el coeficiente del material y el espectro de frecuencias del sonido, respectivamente. También cuenta con la ventaja de poder pausar el plot, en caso de querer mostrar algo específico.

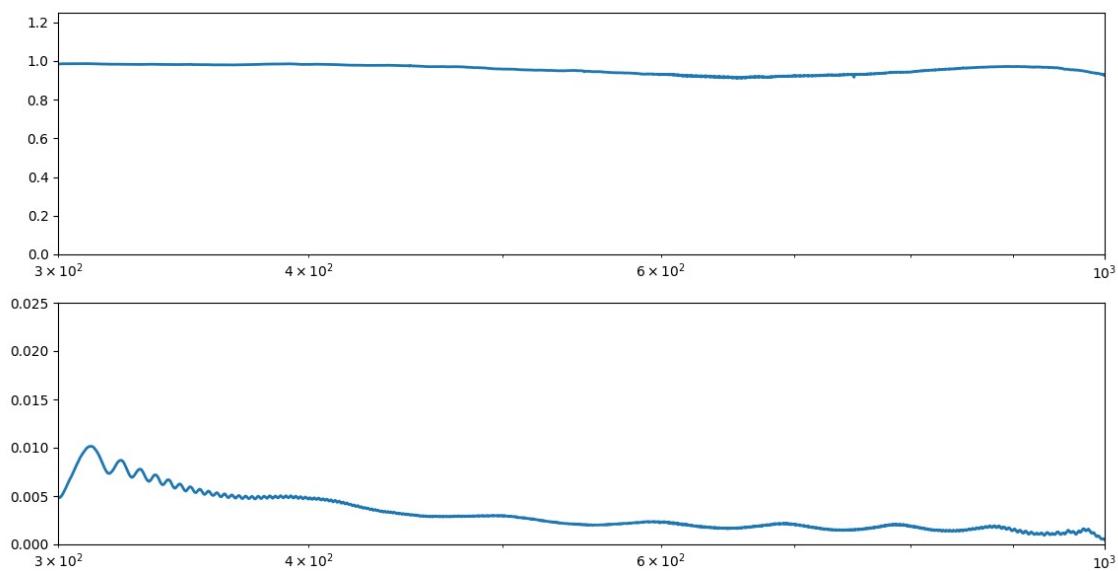


Figura 29: Plot coeficiente y espectro de frecuencias.

En el caso de la figura 29 fue seleccionado el valor de absorción, y fueron pasados los parámetros nominales de frecuencia mínimo y máximo.

## 8. Adaptador de impedancia

### 8.1. Hardware

#### 8.1.1. Altavoz

**8.1.1.1. Altavoz elegido** Para la puesta en marcha del proyecto fue necesario disponer de un altavoz de confianza. Esto es así ya que es de preferencia contar con los parámetros Thiele-Small siendo algunos pocos los que se consiguen nacionalmente con los mismos.

El altavoz que se decidió comprar es un Faital-Pro, modelo 8FE32. El mismo también es de 4", 8 $\Omega$  pero es de 30W de potencia. Como mencionamos anteriormente, se adquirió este nuevo altavoz debido a que el fabricante brinda en su página web los parámetros del mismo. Estos parámetros son fundamentales a la hora de hacer los cálculos de impedancia. Más adelante se hablará mas detalladamente de éstos y su relevancia.

**8.1.1.2. Parámetros propios del altavoz** En la figura 30 podemos ver la respuesta en frecuencia del parlante. Esta gráfica puede obtenerse del sitio web del fabricante. Por otro lado, en la figura 31 podemos ver la gráfica de la impedancia en función de la frecuencia de nuestro parlante. Se nota claramente un pico de valor superior a los 60 $\Omega$  en frecuencias cercanas a los 100Hz. Asimismo, la frecuencia de resonancia puede ser fácilmente deducida desde la gráfica de la respuesta en frecuencia del altavoz(fig. 30). Se puede ver claramente como a partir de los 100Hz (misma frecuencia que en la impedancia) cambia la pendiente de la gráfica, ubicándose en esa zona un cero en su función transferencia.

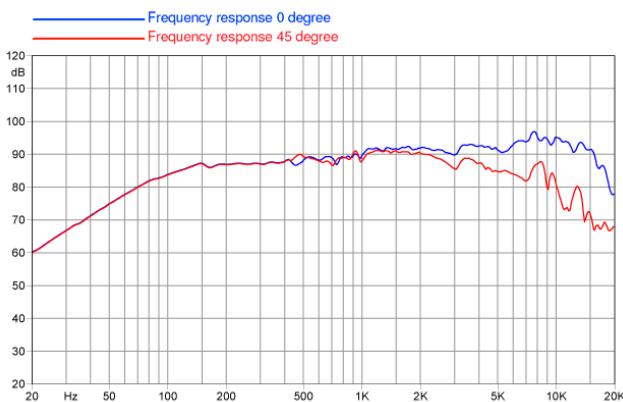


Figura 30: Respuesta en frecuencia del altavoz.

Generalmente, el fabricante brinda con el altavoz una hoja de datos en la cual podemos encontrar parámetros propios del mismo, estos se conocen como parámetros Thiele-Small<sup>11</sup>. A continuación se describen cuales son estos parámetros:

<sup>11</sup>Los parámetros Thiele-Small son un conjunto de parámetros electromecánicos que definen el rendimiento de baja frecuencia especificado de un controlador de altavoz.

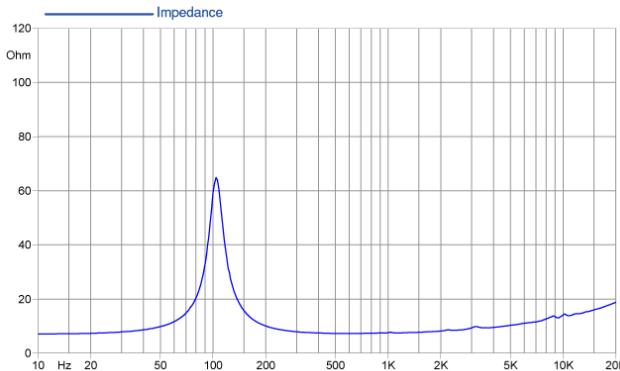


Figura 31: Impedancia vs frecuencia.

$f_s$ : Frecuencia de resonancia del parlante al aire libre (sin bafle y lejos de superficies reflectantes)

$Q_{ms}$ : Factor de mérito debido a las pérdidas mecánicas

$Q_{es}$ : Factor de mérito debido a las pérdidas eléctricas

$R_e$ : Resistencia eléctrica de la bobina en corriente continua

$R_{es}$ : Resistencia eléctrica equivalente a la fricción de la suspensión

$V_{as}$ : Volumen cuya compliancia acústica equivale a la de la suspensión

$L_e$ : Inductancia de la bobina

$Q_{ts}$ : Factor de mérito total (mecánico y eléctrico)

$B_t$ : Constante de transducción electromecánica

$C_{ms}$ : Compliancia mecánica de la suspensión

$M_{md}$ : Masa del diafragma

$M_{ms}$ : Masa equivalente incluyendo la masa de radiación

Toda esta información que se mostró anteriormente se obtiene de la hoja de datos del fabricante. Poniendo en comparación el parlante Full-Energy (emisor) y el Faital-Pro (receptor) podemos deducir que el trabajo va a ser mucho mas fiable si trabajamos con un parlante del cual conocemos sus curvas características así como también sus parámetros Thiele-Small.

### 8.1.2. Caja acústica

Consideremos un altavoz que opera al aire, es decir, sin pantalla. Durante su movimiento existirá una sobre presión en la parte frontal conjuntamente con una depresión en la parte trasera, o viceversa. Para el caso de medias o altas frecuencias, el movimiento de volumen de aire, no es un inconveniente. Sin embargo, para las bajas frecuencias donde el altavoz radia omnidireccionalmente y la longitud de onda es comparable con su tamaño, el desfasaje entre la onda frontal y la onda trasera produce cancelaciones reduciendo así la respuesta del altavoz en dicho rango de frecuencia.

La forma de evitar este inconveniente es colocar el altavoz en una pantalla infinita que aíslle las ondas radiadas por la parte frontal y la posterior. Dado que esto no es realizable en la práctica lo que se hace es colocar los altavoces en sistemas de pantallas finitas cuyas dimensiones sean lo suficientemente grandes para que el efecto indeseado no afecte la respuesta en bajas frecuencias del altavoz.

La solución más sencilla es construir una caja cerrada (o bafle) dejando solo un orificio para colocar el altavoz, de forma que la radiación de la parte posterior queda confinada dentro de la caja hasta que se absorbe por completo.

A continuación, se mencionan los dos tipos de bafles que se pueden encontrar comúnmente.

- **Bafle:** Consiste en una caja completamente cerrada como podemos ver en la figura 32. Su único orificio es en el cual se ubica el altavoz. La misma se encuentra rellena de material absorbente evitando reflexiones indeseadas de ondas sonoras, siendo la calidad de sellado de la caja un punto muy importante a la hora de hablar de calidad final de sonido.

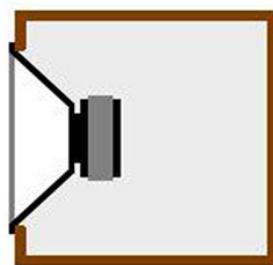


Figura 32: Corte transversal de un bafle.

- **Bafle reflector de bajos:** Consiste en una caja con 2 orificios ubicados en la misma cara. La construcción del mismo se aprecia en la figura 33. Uno es donde se ubica el altavoz, y otro cumple la función de redirigir/radiar la masa de aire que se desplaza dentro del recinto hacia el exterior a través del túnel aumentando el total de caudal irradiado en la misma dirección.

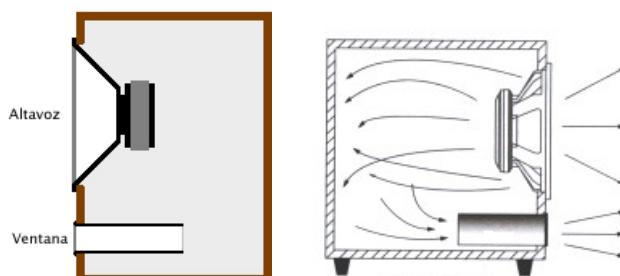


Figura 33: Bafle ventilado.

Debido a la aplicación de nuestro proyecto, nos encontramos con la necesidad de utilizar un bafle sin reflector de bajos, el cual fue diseñado teniendo en cuenta los valores de impedancia del parlante y nuestro objetivo. La imagen de la caja acústica se muestra a continuación:



Figura 34: Caja acústica con parlante.

**8.1.2.1. Diseño de la caja** Para el correcto diseño de una caja hay que tener en cuenta los parámetros Thiele-Small del altavoz. La frecuencia de resonancia de un altavoz viene determinada por características constructivas del mismo al igual que el resto de los parámetros. Este es uno de los parámetros mas importantes a tener en cuenta a la hora de diseñar un bafle. Como aclaramos anteriormente, la brinda el fabricante en la hoja de datos. Esta frecuencia es aquella a la cual el cono del altavoz tiene una mayor tendencia a vibrar por sobre las otras frecuencias. Esta frecuencia puede variar cuando se introduce el altavoz en un bafle. Esto es así ya que, un recinto cerrado ocasiona que el cono tenga mayor rigidez, teniendo que comprimir el aire que se encuentra en el interior del bafle. Debido a esta mayor rigidez, vemos un cambio en la compliancia acústica, por lo que podemos decir que veremos incrementada la frecuencia de resonancia del altavoz.

En las ecuaciones 24 y 25 podemos ver matemáticamente como afecta el hecho que el altavoz sea introducido en una caja cerrada, aumentando la frecuencia de resonancia. Por otro lado en la figura 35 podemos ver una representación gráfica del sistema para entender las ecuaciones.

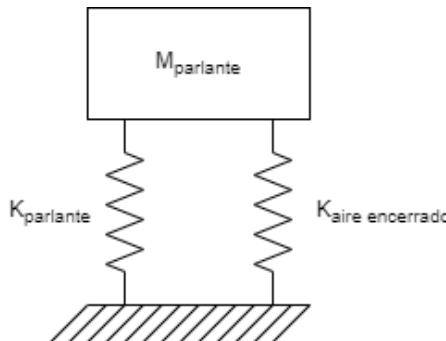


Figura 35: Representación gráfica del sistema mecánico cono-aire del altavoz.

$$K_{\text{TOTAL}} = K_{\text{parlante}} + K_{\text{aire encerrado}} \quad (24)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\text{TOTAL}}}{M_{\text{parlante}}}} \quad (25)$$

Habiendo puesto en comparación los dos modelos de caja posibles a implementar (hay otros modelos pero no tienen sentido en esta aplicación) decidimos que lo mejor será fabricar una caja sellada. Esto es así debido a que tiene mejor respuesta transitoria y además su dificultad de construcción es menor a la de un bafle ventilado, solo tendremos que tener en cuenta que el volumen de la caja sea mayor al parámetro  $V_{AS}$ <sup>12</sup> brindado por el fabricante. Esto es así ya que, mientras mayor sea el volumen de nuestra caja, más se asimilará a una pantalla infinita haciendo que nuestra frecuencia de resonancia del parlante no se vea alterada. Si utilizaremos una caja de volumen menor a  $V_{AS}$ , nuestra frecuencia de resonancia se vería incrementada. Esto se mostrará gráficamente mas adelante cuando abordemos el tema de la impedancia del circuito derivador.

El tubo de impedancia se encuentra apoyado con unas bases impresas en 3D lo cual lo eleva  $(5 \pm +0.1)cm$ , por lo que el diseño de la caja se realizó teniendo en cuenta esta elevación.

Lo que hicimos fue proponer ciertas dimensiones para la cara en la cual se situaría el altavoz. Luego, en base a esa cara, obtuvimos el resto del prisma. Sabiendo qué el diámetro mayor del altavoz es de 129.85mm (figuras 36 y 37) y que el volumen dentro del recinto deberá ser mayor a 2.3 litros proponemos las siguientes dimensiones:

- Alto: 200mm
- Ancho: 150mm
- Largo: 200mm

<sup>12</sup>Volumen en litros a partir del cual la caja puede comportarse como un divisor de lado frontal y trasero ó, si el volumen de la caja es menor, el aire comprimido aporta a la suspensión del altavoz.

Dáandonos un volumen total de:

$$\text{Alto} \times \text{Ancho} \times \text{Largo} = 0.0069m^3 - > 6\text{Litros.} \quad (26)$$

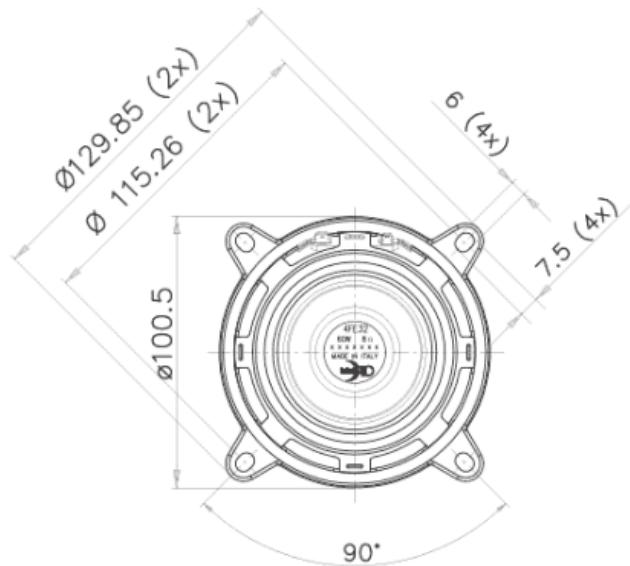


Figura 36: Dimensiones del parlante(vista frontal).

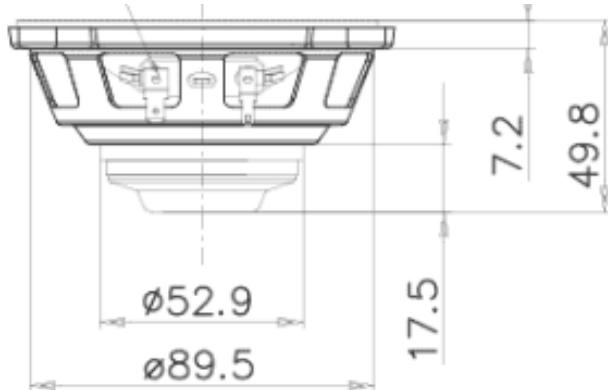


Figura 37: Dimensiones del parlante(vista lateral).

Una vez propuestas las dimensiones de la caja y teniendo las especificaciones del fabricante se diseñó una caja la que se muestra en la figura 34. Se ubicó el orificio para el parlante teniendo en cuenta la altura de las bases sobre la cual se monta el tubo de impedancia.

### 8.1.3. Circuito adaptador

**8.1.3.1. Introducción** Como hemos mencionado anteriormente, el objetivo del adaptador es absorber ondas incidente con distintas frecuencias en la terminación del tubo acústico para que ninguna onda sonora sea reflejada. Para eso, se utiliza el método de circuito derivador, el cual esta basado en el control activo de la impedancia acústica del parlante colocado en el extremo. Cuando la impedancia acústica del parlante llega a la misma impedancia que el interior del tubo se logra la absorción. Para esto, es necesario saber cual es la impedancia del parlante, lo cual fue demostrado a partir de la ecuación 8 .

**8.1.3.2. Simulación** Para poder visualizar los valores de impedancia que tendría que tener el circuito, partimos de la igualdad anterior mencionada y creamos una simulación del circuito en el programa MATLAB. Como primera instancia simulamos la curva del sistema completo en si, ya expresados en 5.2, es decir el parlante con sus parámetros y la caja. Luego, utilizando la igualdad, despejamos la variable de la impedancia ideal del circuito derivador en la cual habría adaptación total del sistema, como se observa en la figura 38.

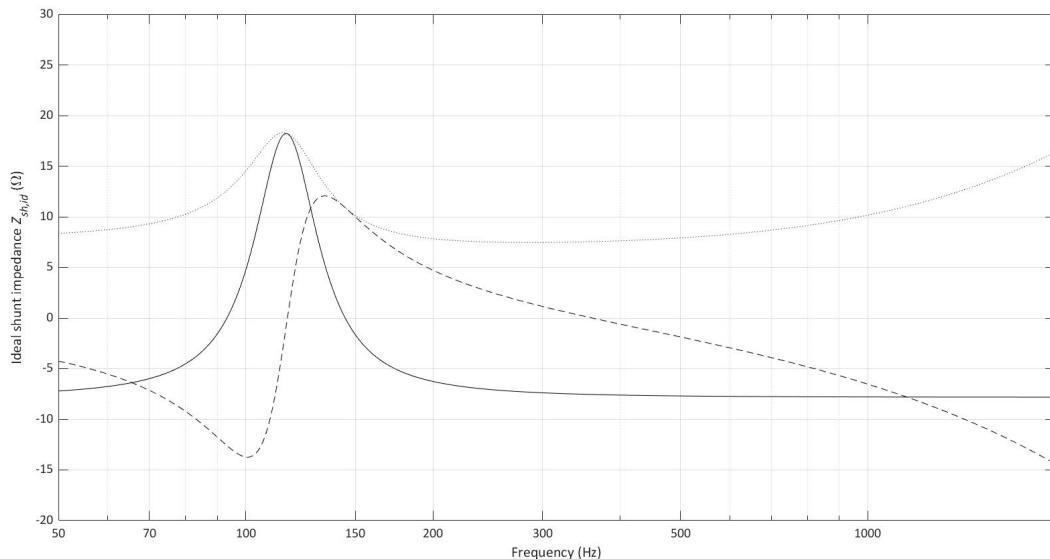


Figura 38: Impedancia ideal del circuito de derivación.

Como se observa en la figura, la parte real de la impedancia ideal del circuito, aproximadamente a partir de la frecuencia 130 Hz, su valor es negativo. Por lo tanto, es necesario el uso de un convertidor negativo de impedancia, el cual se describe en la siguiente sección.

**8.1.3.3. Convertidor de impedancia negativa - NIC** El convertidor de impedancia negativa (NIC) es un elemento de circuito activo que ha sido cada vez más útil en aplicaciones de baja frecuencia. Es un dispositivo de 2 bornes que convierte cualquier impedancia de carga en un borne a una impedancia de entrada  $-Z$  como se ve en el otro puerto. El NIC se puede utilizar para sintetizar impedancias negativas y admitancias que luego se utilizan para generar funciones de transferencia o funciones de impedancia que no son físicamente realizables sin circuitos activos. En nuestro caso particular, lo que se busca lograr es obtener una impedancia similar a la que se obtiene en las simulaciones.

Debido a condiciones de estabilidad del circuito, el esquema del NIC, debe ser modificado en este caso particular, cuando el voltaje en la entrada del circuito de derivación es más alto del máximo permitido. Por lo tanto, utilizaremos el esquema de la figura 39.

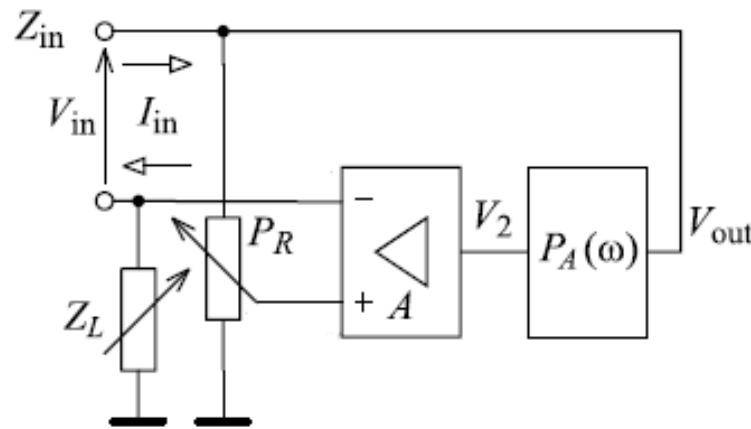


Figura 39: Circuito NIC modificado.

El esquema diferencial del circuito (Figura 39), se puede dividir en dos secciones:

- Amplificadora (A): Esta etapa cuenta con dos partes, una etapa diferencial la cual tiene ajustado un valor de ganancia  $A = 50$ , y una etapa no inversora, con una ganancia  $A = 3$ .
- Filtros ( $P_A$ ): Esta etapa cuenta con dos filtros, ambos de primer orden. Primero un filtro pasa bajo y luego un filtro pasa alto, los cuales aportan a la estabilidad del sistema.

La fórmula final para la entrada de impedancia del NIC queda determinada por:

$$Z_{in} = \frac{AP_A P_R - AP_A - 1}{AP_A P_R - 1} Z_L \quad (27)$$

donde la función transferencia del filtro  $P_A$  queda determinada por un pasa bajo en cascada con un pasa alto, ambos de primer orden.

En la figura 40 se muestra el esquemático del circuito con las distintas etapas.

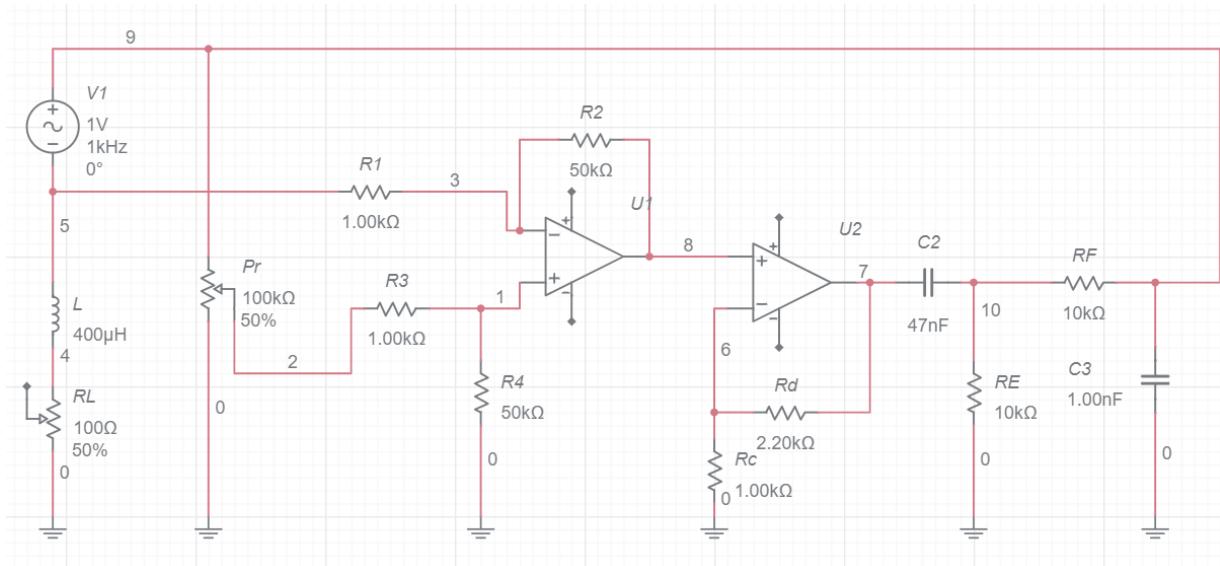


Figura 40: Esquemático circuito adaptador.

En el esquemático podemos ver las dos etapas de amplificación con 2 AO LF353. . La diferencial con ganancia  $A=50$  y la no inversora con ganancia  $A=3,2$ . Con lo cual, en la ecuación 27,  $A=$  toma un valor de 160. Este es un valor no elevado ya que el NIC suele tener problemas de estabilidad.

La fuente alterna  $V_1$ , representa la fem generada por el parlante. Abajo de esta se encuentra la impedancia  $Z_L$ , la cual esta compuesta de una resistencia variable y una inductancia.

En la entrada no inversora del Amplificador diferencial y unido a la realimentación, se encuentra el potenciómetro  $Pr$ .

Nuestro objetivo es que este circuito visto desde el parlante, tenga la misma impedancia que la figura 38, que representa la impedancia ideal en la cual habría adaptación completa de la impedancia.

Para lograr esto, realizamos una simulación del circuito real, tratando de igualar el Bode de impedancia en un rango de frecuencias. En la figura 41, se muestra un ploteo de la parte real e imaginaria de la impedancia ideal, y la del circuito.

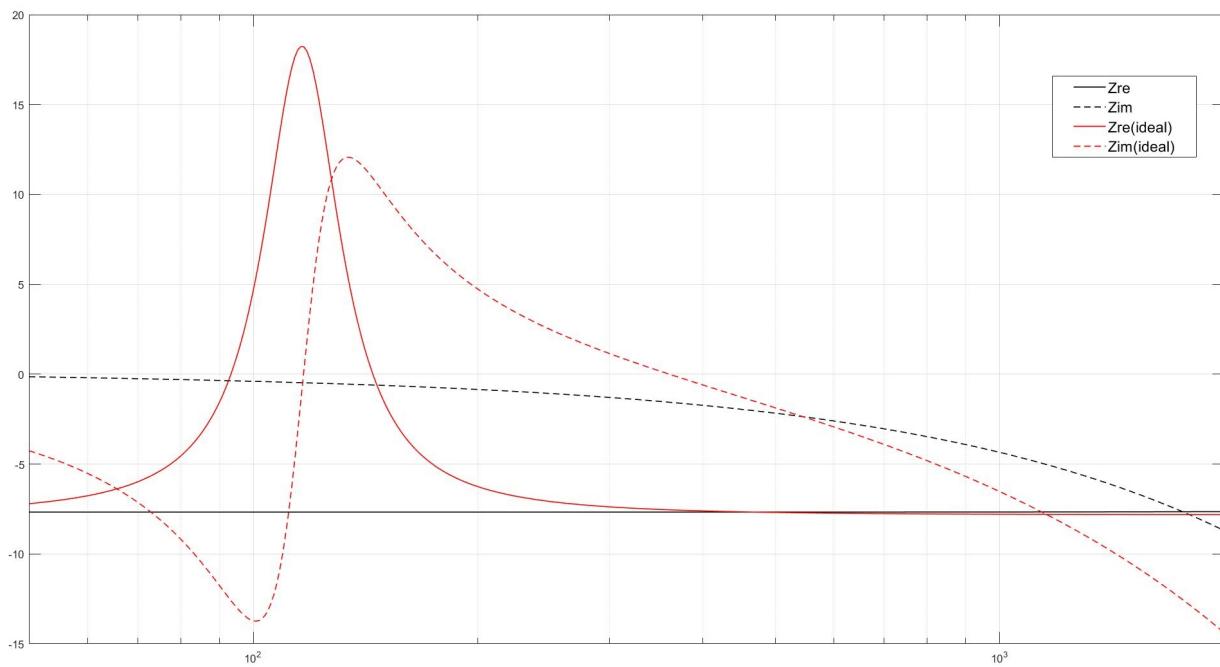


Figura 41: Impedancia ideal vs impedancia real.

En la simulación, para lograr igualar la curva se fue variando los parámetros disponibles, es decir: la amplificación,  $R_L$  y  $Z_L$ ,  $P_R$  y la etapa de filtros.

Las variables mas significativas fueron:  $R_L$ ,  $Z_L$  y  $P_R$ , respectivamente.

Es decir, variando la resistencia  $R_L$ , podemos modificar significativamente el valor real del circuito. Variando la  $Z_L$ , modificamos el polo de la parte imaginaria del circuito, y finalmente variando  $P_R$ , modificamos ambas.

Observamos que para ciertos valores, aproximadamente en la frecuencia de 550 Hz se logra una igualdad de ambas curvas, por lo tanto, en el circuito real se toman los parámetros:

- $P_R = 50$
- $R_L = 7.5476 \text{ Ohm}$
- $Z_L = 400 \mu\text{H}$

## 9. Resultados

### 9.1. Medición del coeficiente en tiempo real

En esta sección mostraremos los plots del programa, con sus respectivos materiales. En el primer subplot se observa el coeficiente de reflexión y en el segundo el coeficiente de absorción del material.

Primeramente se hace el estudio sobre un material absorbente para comprobar que el coeficiente de reflexión sea bajo. Podemos ver en la figura 42 que se trata de una goma espuma y en la figura 43 observamos la gráfica de reflexión y absorción característica del material absorbente la cual tiene un funcionamiento correcto, ya que se encuentra con los resultados previstos.



Figura 42: Material de goma espuma acústica.

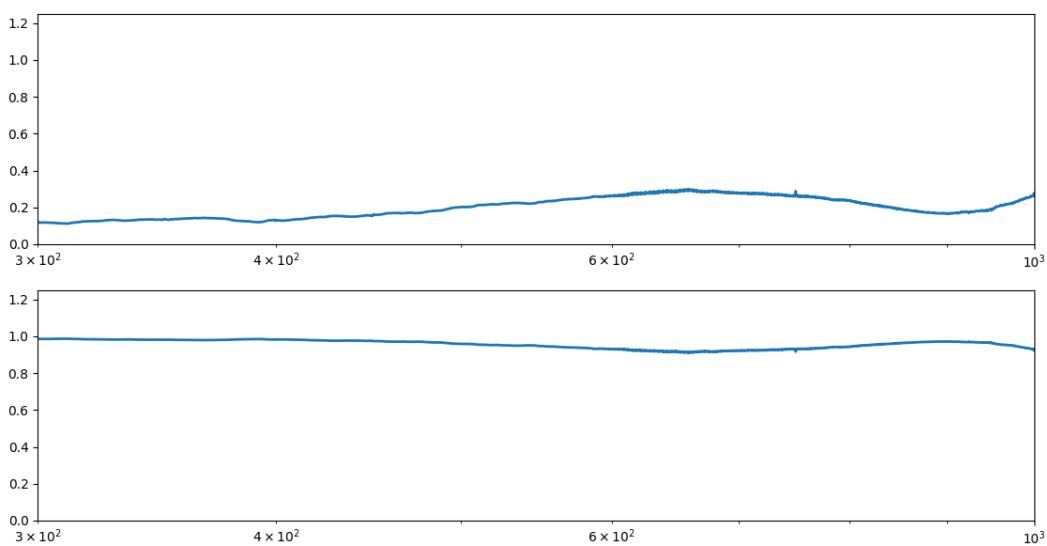


Figura 43: Plot de material absorbente.

A continuación, en la figura 44 podemos ver un costado de la caja del parlante, utilizado como extremo rígido mientras que en la figura 45 observamos tanto el coeficiente de reflexión y absorción característica del material rígido utilizado.



Figura 44: Material rígido.

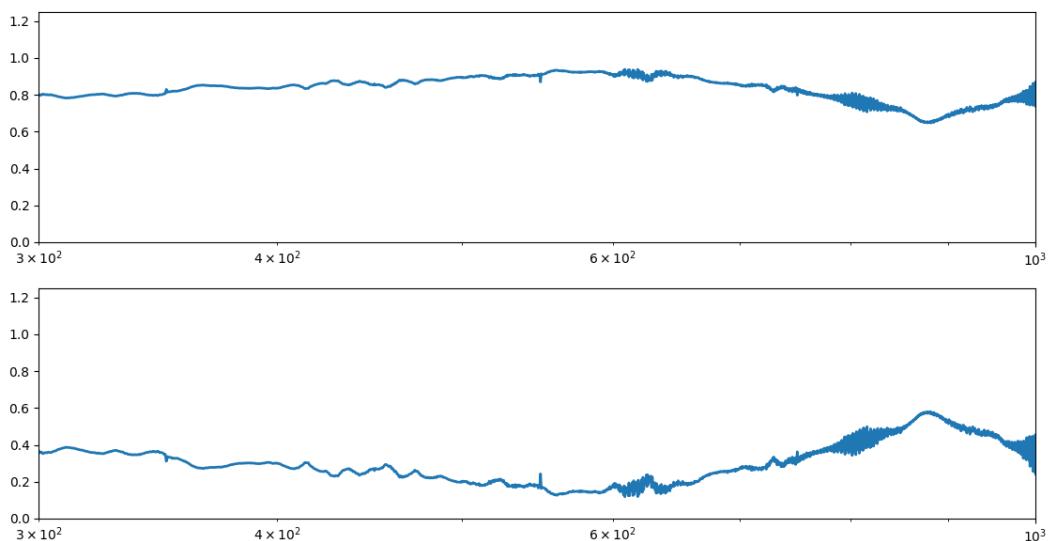


Figura 45: Plot de material rígido.

En la figura anterior, vemos un comportamiento también correcto, ya que es razonable un alto nivel de reflexión debido a la rigidez del material.

## 9.2. Adaptador de impedancia

En esta sección se mostraran dos resultados del programa, conectando y desconectando la fuente de energía del circuito, lo cual deja el parlante aislado, para diferenciar la influencia del circuito adaptador en el sistema. También se varia el volumen de la fuente sonora con lo cual varia la FEM generada en el altavoz hacia el circuito.

Primero, en las figuras 46 y 47 mostraremos los resultados con bajo volumen, y con el circuito desconectado y conectado, respectivamente. Luego, en las figuras 48 y 49 se muestran los resultados con volumen alto.

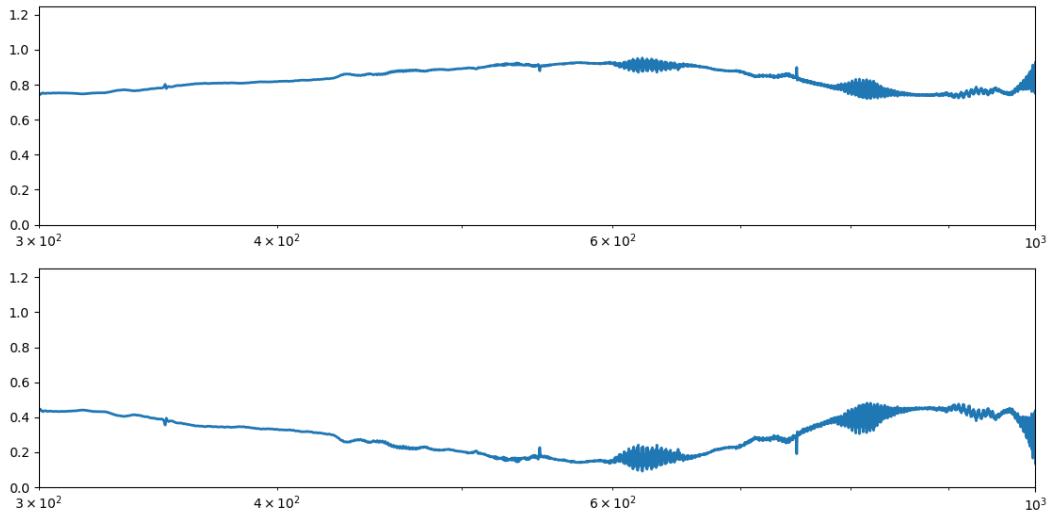


Figura 46: Plot con bajo volumen y circuito desconectado.

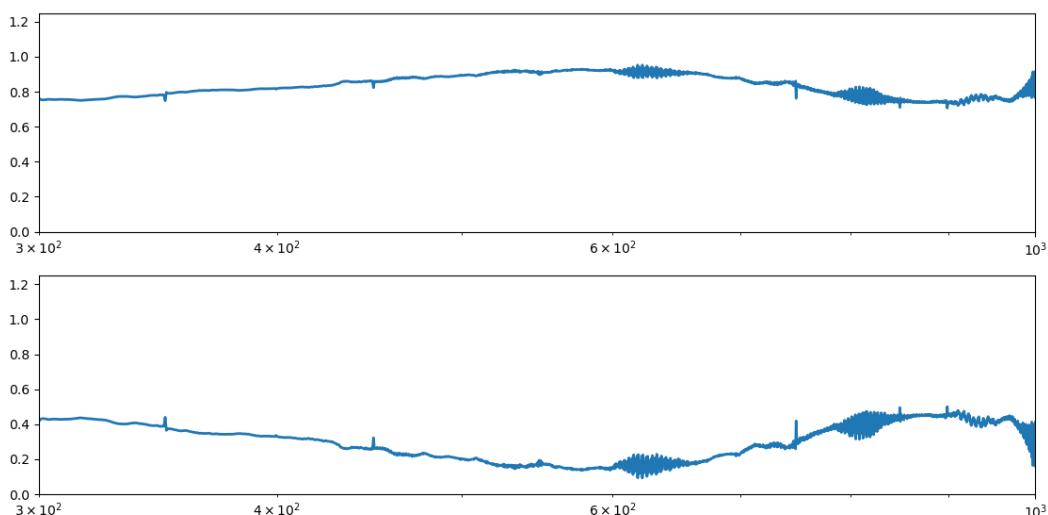


Figura 47: Plot con bajo volumen y circuito conectado.

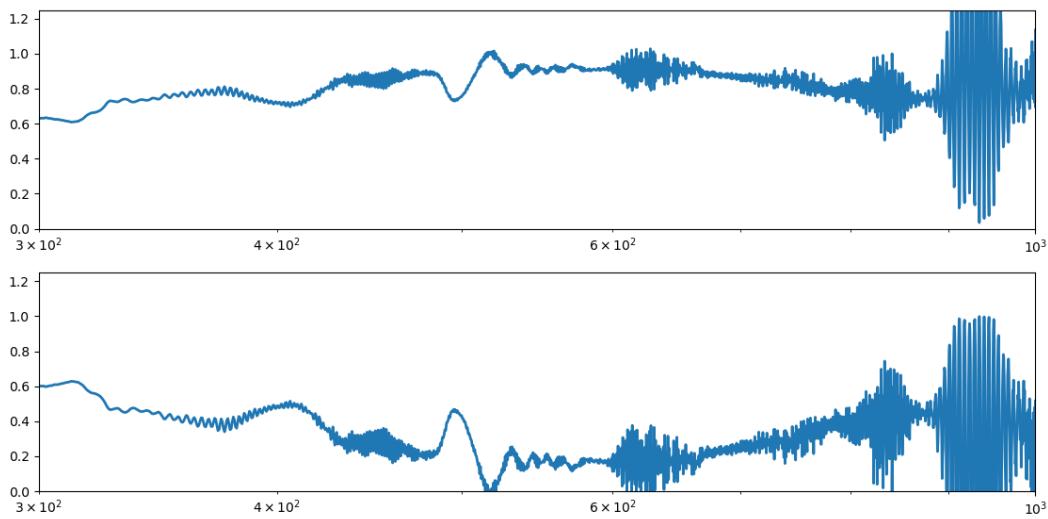


Figura 48: Plot con alto volumen y circuito desconectado.

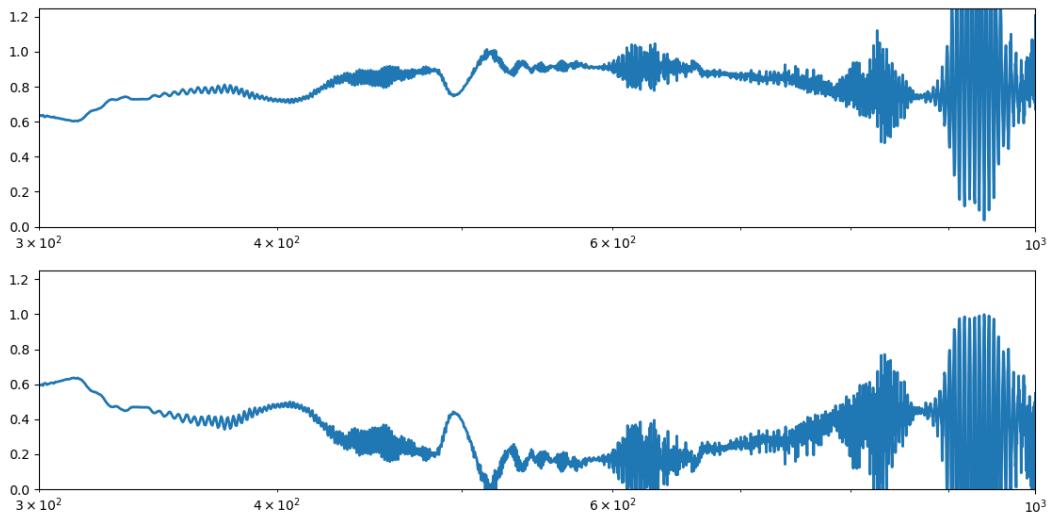


Figura 49: Plot con alto volumen y circuito conectado.

Podemos observar que no hay una diferencia significativa en las figuras conectando y desconectando el circuito.

También se observa que en el plot de alto volumen se encuentra una mayor dispersión del valor, creemos que esto es debido a la no rigidez de la membrana del parlante, pudiendo esta amortiguar naturalmente algunas componentes del sonido.

## 10. Conclusiones

### 10.1. Medición del coeficiente en tiempo real

Podemos concluir de las secciones anteriores (9.1 y 9.2) que el programa para medir la reflexión y absorción de cada material esta en correcto funcionamiento. Es de gran utilidad la función en tiempo real ya que no es necesario realizar una grabación de la señal de audio para procesarla, pudiendo observar los cambios en las gráficas simplemente cambiando de material.

También es importante mencionar que en la figura 43 los valores de absorción son casi cercanos al 100 % en todo el rango de estudio del tubo. Esto implica una absorción de la onda en casi su totalidad, simulando con un excelente desempeño la onda propagante.

Si se quisiera hacer un estudio final, por ejemplo, filtrar un rango de frecuencia menor al estudiado y ver los resultados en condición de onda propagante, entendemos que este seria el mejor método de control acústico para lograrlo. El programa en si también grafica el espectro de frecuencias, en el caso de querer observar las componentes y su respectiva potencia.

### 10.2. Adaptador de impedancia

Del circuito podemos concluir que no se logra el objetivo final, ya que de la sección anterior en las figuras 48 y 49 se observa que no hay una actuación del circuito sobre el parlante.

Entendemos que esto es así, porque no se logra una adaptación correcta, es decir la curva de impedancia del circuito real, no logra ser igual a la curva del circuito ideal ya calculado en la simulación 8.1.3.2.

Podemos observar de las figuras siguientes (50 y 51) como variando el parámetro de la resistencia en la simulación en un 0.5 % de su valor, la parte real y la parte imaginaria coinciden en distintas frecuencias por separado, lo cual genera que no haya una adaptación de impedancia. Esta igualación requiere de una precisión muy alta, y en el circuito los parámetros reales de los componentes tienen una dispersión que hace que esto resulte extremadamente difícil.

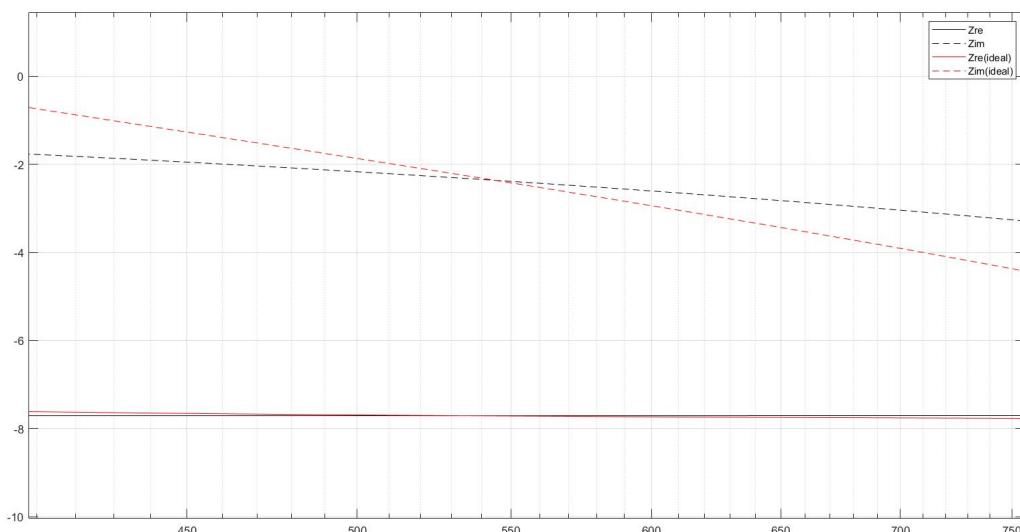


Figura 50: Plot de las impedancias con  $R_l = 7.5476 \Omega$ .

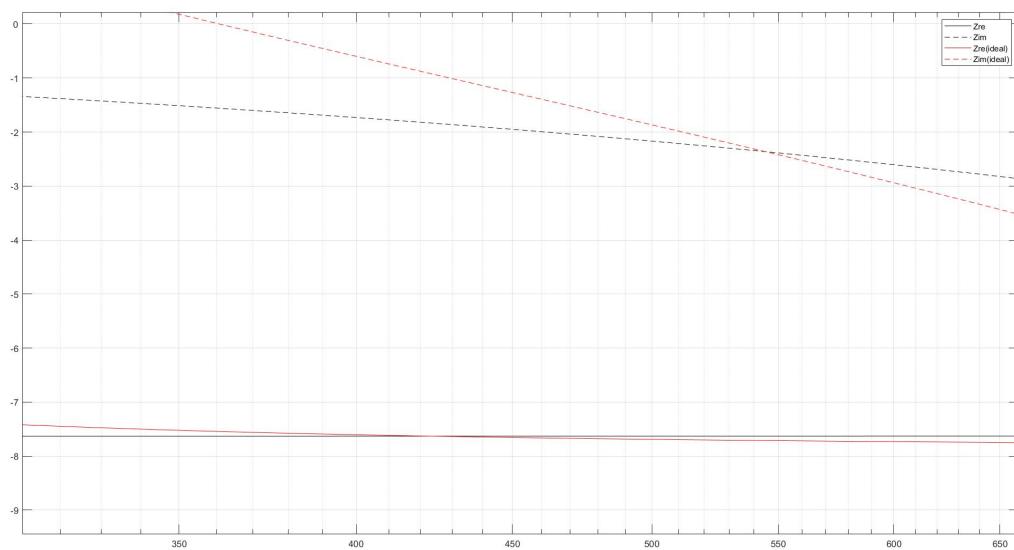


Figura 51: Plot de las impedancias con  $R_L = 7.51005 \Omega$ .

Esto se podría solucionar, haciendo mas compleja la red de  $Z_L$  de la figura 52. Es decir, al agregar elementos no lineales, la curva de la impedancia real podría obtener una mejor pendiente, mas similar a la ideal. Esto haría que no sea necesario tener una precisión tan alta, a cambio de un nivel mas complejo del circuito en materia de electrónica y control.

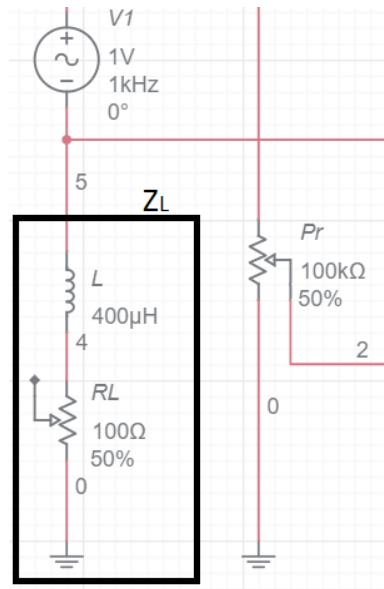


Figura 52: Impedancia  $Z_L$ .

## Referencias

- [1] J. Álvarez Sánchez y G. Lozano González. *Diseño y construcción de un dispositivo para medir coeficientes de absorción de materiales*. En: (jun. de 2007).
- [2] M. Cernik y P. Mokrý. *Sound reflection in an acoustic impedance tube terminated with a loudspeaker shunted by a negative impedance converter*. En: «Smart Materials and Structures» 21 (oct. de 2012).
- [3] P. Cobo Parra. *Control Activo del Ruido de Baja Frecuencia en el Instituto de Acústica del CSIC*. En: () .
- [4] *Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method*. Standard. Geneva, CH: International Organization for Standardization, mar. de 2000.
- [5] H. Koruk y G. Genc. «Acoustic and mechanical properties of luffa fiber-reinforced bio-composites». En: 2019.
- [6] H. Lissek. *Les Absorbeurs Electroacoustiques: un Concept Unique pour différentes Stratégies de Contrôle Actif d'Impédance Acoustique*. En: (abr. de 2010).
- [7] H. Lissek. *Shunt loudspeaker technique for use as acoustic liner*. En: 2 (ene. de 2009).
- [8] F. Miyara. *Electroacústica*. En: (2015).
- [9] F. Miyara. *Introducción a la electroacústica*. En: (2015).
- [10] M. Möser y J. Barros. *Ingeniería Acústica - 2da edición*. Ed. por Springer. 2009.
- [11] F. Sears y M. Zemansky. *Física Universitaria*. Ed. por Pearson. Vol. 2. 2011.
- [12] D. Soto, L. Herrera Fernández, O. Acosta y M. Herrera Martínez. *Evaluation of an acoustic conditioning panel made from typical Colombian fibres*. En: «Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia» (oct. de 2019).
- [13] Y. Zhang, Y. Chan y L. Huang. *Thin broadband noise absorption through acoustic reactance control by electro-mechanical coupling without sensor*. En: «The Journal of the Acoustical Society of America» (2014).

## 11. Anexo

### 11.1. Código Python

```
import pyaudio
import sys
from PyQt5.uic import loadUi
from PyQt5.QtWidgets import QDialog, QApplication, QStackedWidget, QLabel, QComboBox
from PyQt5.QtCore import Qt
from PyQt5.QtGui import QPixmap
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.fft as fft
from tkinter import TclError

class WelcomeScreen(QDialog):
    def __init__(self):
        super(WelcomeScreen, self).__init__()
        loadUi("interfaz.ui", self)
        global p, FORMAT, CHANNELS, RATE, CHUNK, F, C, pi, s, dist, ko
        p = pyaudio.PyAudio()
        FORMAT = pyaudio.paFloat32
        CHANNELS = 2
        RATE = 44100
        CHUNK = 2 * RATE
        F = np.arange(-RATE / 2, RATE / 2, RATE / (CHUNK))
        c = 328
        pi = np.pi
        s = 0.135
        dist = 0.385
        ko = 2 * pi * F / c
        devicesArray = []
        # Print dispositivos
        for i in range(0, 10):
            print(i, p.get_device_info_by_index(i)[ 'name' ])
            devicesArray.append(p.get_device_info_by_index(i)[ 'name' ])

        # adding list of items to combo box
        self.comboBox.addItems(devicesArray)

        # item
        item = devicesArray[0]

        # setting current item
        self.comboBox.setCurrentText(item)
        self.started = False
        self.startButton.clicked.connect(self.start)
        self.pauseButton.clicked.connect(self.pause)
        self.pixmap = QPixmap('img.jpg')
        self.label = QLabel(self)
        self.label.setPixmap(self.pixmap)
        self.label.setAlignment(Qt.AlignCenter)
        self.label.lower()
        self.setWindowTitle('Reflection-Measurment')
        self.fMin.setToolTip('Frecuencia_minima_a_introducir_300Hz')
        self.fMax.setToolTip('Frecuencia_maxima_a_introducir_1000Hz')
        self.rBAbsor.setToolTip('Seleccione_si_desea_plotear_el_coef_de_absolucion')
        self.rBReflex.setToolTip('Seleccione_si_desea_plotear_el_coef_de_reflexion')
```

```

self.rBReflex.setChecked(True)
self.startButton.setToolTip('Click para comenzar a graficar')
self.pauseButton.setToolTip('Click para finalizar el grafico')

def start(self):
    mic = self.comboBox.currentIndex()
    fMax = int(self.fMax.text())
    fMin = int(self.fMin.text())
    if self.rBAbsor.isChecked():
        index=1
    if self.rBReflex.isChecked():
        index=0
    if not self.started:
        self.started = True
        self.plot(fMin,fMax,index,mic)

def pause(self):
    if self.started:
        self.started=0

def plot(self, fMin, fMax, index, mic):
    # Obtengo los datos del microfono
    stream = p.open(
        format=FORMAT,
        channels=CHANNELS,
        rate=RATE,
        input=True,
        output=False,
        frames_per_buffer=CHUNK,
        input_device_index=mic)

    fig, (r, absr) = plt.subplots(2, figsize=(15, 7))
    line, = r.semilogx(F, np.random.rand(CHUNK), '- ', lw=2)
    line2, = absr.semilogx(F, np.random.rand(CHUNK), '- ', lw=2)

    # Limites plot
    if fMin < 300 or fMin >= fMax or fMin > 1000:
        fMin = 300
    if fMax > 1000 or fMax <= fMin or fMax < 300:
        fMax = 1000

    r.set_ylim(0, 1.25)
    r.set_xlim(fMin, fMax)
    absr.set_ylim(0, 0.025)
    absr.set_xlim(fMin, fMax)

    plt.show(block=False)
    while self.started:
        # Datos binarios
        data = stream.read(CHUNK)
        result = decode(data, CHUNK, CHANNELS)

        # Realizo transformada y le asigno los valores al eje Y
        y_fft = fft.fft(result[:, 0])
        y_fft2 = fft.fft(result[:, 1])

```

```

y_fft = fft.fftshift(y_fft / RATE)
y_fft2 = fft.fftshift(y_fft2 / RATE)

hi = np.exp(-1j * ko * s)
hr = np.exp(1j * ko * s)
h12 = y_fft / y_fft2
r = ((h12 - hi) / (hr - h12)) * np.exp(2 * 1j * ko * dist)
absr = (1 - abs(r) ** 2)

if index == 0:
    line.set_ydata(abs(r))
    line2.set_ydata(abs(y_fft))
if index == 1:
    line.set_ydata(absr)
    line2.set_ydata(abs(y_fft))
try:
    fig.canvas.flush_events()
    fig.canvas.draw()

except TclError:
    print('Stream_stopped')
    break
plt.close()

def decode(in_data, CHUNK, channels):
    """
    Convert a byte stream into a 2D numpy array with
    shape (chunk_size, channels)

    Samples are interleaved, so for a stereo stream with left channel
    of [L0, L1, L2, ...] and right channel of [R0, R1, R2, ...], the output
    is ordered as [L0, R0, L1, R1, ...]
    """
    # TODO: handle data type as parameter, convert between pyaudio/numpy types
    result = np.fromstring(in_data, dtype=np.float32)

    result = np.reshape(result, (CHUNK, channels))
    return result

if __name__ == '__main__':
    app = QApplication(sys.argv)
    welcome = WelcomeScreen()
    widget = QStackedWidget()
    widget.addWidget(welcome)
    widget.setFixedWidth(800)
    widget.setFixedHeight(500)
    widget.show()
    try:
        sys.exit(app.exec())
    except:
        print("Finalizando..")

```

## 11.2. Código Matlab

### 11.2.1. Script $Z_{cd}$ ideal

```
% acoustic parameters of the system
c = 328;
rho = 1.1788;
a = 0.0995/2;
St = pi*a^2;
Zc = rho*c;
Zac = Zc/St;

% independent frequency axis
nn=401;
fmin =50;
fmax = 2000;
f = (logspace(log10(fmin),log10(fmax),nn));
w = 2*pi*f;

% given parameters of the loudspeaker (Monacor SPH-100C)
fs = 104;
Sd2 = 0.00519;
Qms2 = 6.144;
ms2 = 0.0042;
Cms2 = 0.6e-3;
Rms2 = (2*pi*fs*ms2)/Qms2;
Re2 = 7.8;
Le2 = 1.18e-3;
Bl2 = 4.8;
Vb2 = 0.006;
Cab2 = Vb2/(rho*c^2);
mab2 = Sd2^2/St^2*rho*Vb2/3;
Cac2 = Cms2*Sd2^2*Cab2/(Cms2*Sd2^2+Cab2);
mac2 = ms2/Sd2^2+mab2;
Rac2 = Rms2/Sd2^2+2*pi*rho.*f.*f/c;
Ze2 = 1i*w*(Le2)+Re2;

Zshid=1./(Zac-1i*w*mac2-Rac2-1./
(1i*w*Cac2))*Bl2^2./(Sd2^2)-(Ze2);
Zshid_re=real(Zshid);
Zshid_im=imag(Zshid);

sname = ('Impedance_shunt');
figure(1);
semilogx(f,Zshid_re,'k-',f,Zshid_im,'k--',f,abs(Zshid),'k:');
xlabel('Frequency \rm(Hz)', 'fontsize',12, 'fontname','Calibri')
ylabel('Ideal_shunt_impedance \itZ_{sh,id} \rm(\Omega)', 'fontsize',12, 'fontname','Calibri')
set(gca, 'xtick',[40 50 70 100 150 200 300 500 1000]
, 'fontsize',12, 'fontname','Calibri'),
axis([fmin-10 fmax+100 -20 30]),
grid on;
}
```

### 11.2.2. Script $Z_{cd}$ real

```
A=160;
Pr=0.5;
nn=401;
fmin = 50;
fmax = 2000;
f = (logspace(log10(fmin),log10(fmax),nn));
w = 2*pi*f;
s=1i.*w;
w1=194.54545;
w2=100000;
L1=400;
P1=(s./w1)./(1+s./w1);
P2=1./(1+(s.*1.41/w2)-((w.^2)./(w2.^2)));
Pa=P1.*P2;
Zin1=((A*Pr.*Pa-A.*Pa-1)./(A*Pr.*Pa-1)).*(7.5476+s.*L1*1e-6);

%P1.*P2;
% grid on;
figure(1);
semilogx(f,real(Zin1),
'k-',f,imag(Zin1),'k--',f,Zshid_re,'r',f,Zshid_im,'r--')
grid on;
```