



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE  
RUIDO EN DUCTOS

AUTOR

Ernesto Antonio Avilés Zavala

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE  
RUIDO EN DUCTOS

Trabajo de titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos  
para optar por el título de ingeniero en Sonido y Acústica

Profesor Guía

Mg. Miguel Ángel Chávez Avilés

Autor

Ernesto Antonio Avilés Zavala

Año

2018

### DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO EN DUCTOS, a través de reuniones periódicas con el estudiante Ernesto Antonio Avilés Zavala, en el semestre 2018-1, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Miguel Ángel Chávez Avilés  
*MSc. Sustainable Building Engineering*  
C.I. 171072484

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo Diseño y construcción de sistema de control activo de ruido en ductos, del Ernesto Antonio Avilés Zavala, en el semestre 2018-1, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

María Bertomeu Rodríguez  
Máster en Gestión y Evaluación de la Contaminación Acústica  
C.I. 1756773162

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.

---

Ernesto Antonio Avilés Zavala  
C.I. 0925657447

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por ser pilar fundamental en mi desarrollo a lo largo de mi carrera universitaria. A los profesores por el valioso conocimiento que me han impartido contribuyendo a mi formación académica.

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todos mis familiares y amigos que me han acompañado a lo largo de mi vida universitaria, de las cuales he aprendido por sus experiencias y conocimientos.

## **RESUMEN**

En este proyecto, se realiza el diseño y construcción de un sistema de control activo de ruido en ductos. El objetivo principal de este sistema es lograr niveles de atenuación superiores a los 20 decibeles en los niveles de ondas sinusoidales, cuyas frecuencias están entre los 100 a 500 Hz. Estas ondas sonoras se propagan en el interior del sistema de ductos, generando interferencia destructiva entre sí. Para aquello, se diseñó un sistema de ductos adecuados para que ocurra una buena propagación de las ondas que se encuentren en el rango establecido. Además, se acoplaron dos altavoces a dos extremos del sistema de ductos los cuales servirán como fuente de ruido y fuente de señal de anti ruido. Así, mediante computadora, se determinaron los tiempos de retraso necesarios para lograr las máximas cancelaciones en cada banda de tercio de octava en el rango frecuencial establecido. En general, se han logrado atenuaciones de hasta 30 dB.

## **ABSTRACT**

In this Project, a design and construction of an active noise control system in ducts is done. The main purpose of this system is to achieve attenuation levels greater than 20 decibels, in the noise level of sinusoidal waves whose frequencies are between 80 to 500 Hz. This sound waves propagate inside the duct, generating destructive interference. For that, it was necessary to design a ducts system in which a good propagation of the sound waves with the required frequencies occur. Also. Two loudspeakers were attached to two of the ends of the ducts system. These loudspeakers will act as the noise source and the anti noise source. So, by computer, the necessary delay times so that the maximum attenuations are achieved in each third octave band in the established frequency range are determined. In general, attenuations of up to 30 decibels were achieved.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Objetivos .....	4
1.2.1 Objetivo General .....	4
1.2.2 Objetivos Específicos .....	4
1.3 Hipótesis .....	4
1.4 Alcance .....	4
1.5 Justificación .....	5
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	5
2.1 Propagación de ondas sonoras en ductos .....	5
2.2 Propagación de ondas sonoras en ductos .....	8
2.2.1 Fundamentos del control activo de ruido .....	8
2.2.2 Principios Básicos .....	10
2.2.3 Elementos básicos para el sistema de control .....	12
2.2.4 Control de retroalimentación .....	13
2.2.5 Control de compensación .....	16
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	18
3.1 Diseño de sistema de tubería .....	18
3.1.1 Diámetro del ducto .....	20
3.2 Diseño de cadena electroacústica .....	23
3.2.1 Altavoces .....	23
3.2.2 Amplificador de audio .....	26
3.2.3 Dispositivo con entradas y salidas analógicas .....	28
3.2.4 Dispositivo generador de onda sinusoidal .....	29
3.2.5 Micrófono de medición .....	30
3.2.6 Cables .....	31
3.3 Caracterización del sistema de control de ruido .....	33
3.3.1 Respuesta en frecuencia de la tarjeta de sonido .....	34
3.3.2 Respuesta en frecuencia de todo el sistema .....	35
<b>4. RESULTADOS</b> .....	39

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	45
5.1 Conclusiones.....	45
5.2 Recomendaciones.....	46
REFERENCIAS.....	47

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

En la actualidad el ruido es un factor siempre presente. Este factor se produce principalmente en las ciudades más industrializadas debido a la gran cantidad de componentes que posee su infraestructura, por lo que es virtualmente imposible evitar generar ruido en cada sector de una gran ciudad. Por lo tanto, resulta conveniente diseñar soluciones puntuales para reducir el impacto del ruido, manteniendo procesos eficaces y eficientes (Kim, Chol, Xiaotong, 2017).

El término ruido es utilizado en varias aplicaciones tales como la electrónica e incluso la música. Pero para propósitos de este trabajo, y en términos acústicos, el ruido es cualquier sonido que no se desea escuchar. Estos sonidos pueden provenir desde cualquier fuente ya sea una persona hablando o cantando, un automóvil o cualquier otro sonido que pueda provocar alguna respuesta negativa en el oyente. Estas respuestas pueden ser distracción, nerviosismo, molestia, o en casos extremos, daños a la salud (Tanaka, Shi, Chuang, 2017).

Para que en un ambiente exista confort acústico, no es necesario reducir los sonidos molestos en su totalidad, pues solo basta que la diferencia entre el sonido que se desea escuchar y aquel que sea indeseado sea lo más significativa posible (Nabelek *et al*, 2006). En palabras sencillas, el confort acústico se puede lograr, aunque exista ruido en niveles muy bajos. Para lograr esto se requiere hacer un análisis de la o las fuentes sonoras y determinar la solución óptima. Las técnicas de control de ruido varían dependiendo de varios factores ya sean recursos económicos, tiempo disponible, conocimientos necesarios, equipo técnico, etc. las cuales pueden ser pasivas o activas.

El control pasivo de ruido consiste en la aplicación de materiales acústicos cuyas propiedades atenuarán la cantidad de sonido mediante absorción (Jena, Sahoo, Panigrahi, 2014). Entre estos materiales acústicos se encuentran: absorbentes, aislantes y difusores que, una vez el sonido entra contacto con ellos, la energía contenida se ve disminuida por efectos físicos que dependen de las características inherentes de los materiales como la porosidad, densidad, etc.

Sin embargo, el control pasivo del ruido tiene sus limitaciones. En primera instancia, al requerir acondicionamiento de algún tipo, implica utilizar espacio disponible para colocar estos materiales acústicos lo cual reduce el volumen del recinto a tratar. Otra complicación del tratamiento pasivo es que generalmente estos materiales acústicos no son económicos, lo cual resulta en costos excesivos cuando se intenta controlar ruidos con niveles de presión elevados. Además, la efectividad de control pasivo está restringida por la frecuencia. En promedio, un tratamiento con una relación costo-efectividad buena, se da a partir de los 500 Hz (Behera, Das, Subudhi, 2017). Mientras que, para atenuar significativamente los niveles en frecuencias más bajas, será necesaria la implementación de materiales acústicos de grandes dimensiones lo cual afectaría negativamente los aspectos económicos, espaciales y estéticos.

Por su parte, el control activo de ruido consiste en atenuar los niveles de ruido mediante elementos electrónicos. Fundamentalmente, el control activo de ruido se basa en la captación del ruido mediante un micrófono, cuya señal pasará por un procesamiento y finalmente ese resultado será enviado hacia un altavoz que reproduce la misma señal, pero desfasada la cual entrará en contacto con el ruido original, para provocar la mayor cancelación posible (Hu, Rajamani, Yu, 2017).

El control activo de ruido supone varias ventajas respecto al control pasivo, entre ellas, su capacidad de atenuar eficazmente las frecuencias debajo de 500 Hz utilizando dispositivos electrónicos de bajo costo, pequeñas dimensiones y de fácil instalación (Li, Yu, 2017). Además, ciertos sistemas permiten ser reprogramados para cubrir diferentes necesidades y así, modificar factores en sus funcionamientos como el rango de frecuencia eficaz, ganancia, entre otros.

Esto último sugiere que un sistema sofisticado de control activo de ruido es el equivalente a varios sistemas de control pasivos en un solo dispositivo.

Si bien existen muchas aplicaciones del control activo de ruido, este trabajo se enfocará en atenuar los niveles de ruido provocados en ductos de ventilación. Estudios indican que, en estos ductos, es posible lograr atenuaciones de hasta 35 dB en bajas frecuencias (Zhu, *et al.*, 2017) mediante el aprovechamiento de las sumas destructivas generadas dentro del mismo.

La importancia del control activo de ruido en ductos reside en la poca efectividad de los silenciadores pasivos que se suelen utilizar en dichos ductos, que si bien logran atenuaciones significativas en las medias-altas frecuencias, en las bajas frecuencias su efectividad se ve disminuida considerablemente, debido a la limitación física de los elementos pasivos reactivos o disipativos que lo conforman (Yasuda *et al.*, 2013). Por lo que el uso de un silenciador activo se constituye en un complemento efectivo a los pasivos, y así, lograr atenuaciones sustanciales en un espectro frecuencial mucho mayor, en caso de ser necesario.

Sin embargo, el control activo de ruido posee una desventaja importante, y es la sofisticación de la programación requerida. Un prototipo efectivo para muchas situaciones será programado como un sistema adaptativo, es decir, dependiendo de ciertos valores de entrada, este cambiaría automáticamente ciertos parámetros para ajustarse de manera rápida a las necesidades para las que ha sido programado (Kurian, Patel, George, 2017). Esto puede representar la principal desventaja para el diseño de este prototipo pues, Considerando los elementos computacionales de extrema precisión que se requieren, resultaría en un aumento del costo monetario de construir dicho prototipo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar y construir un prototipo de un sistema de control activo de ruido para tonos puros en bajas frecuencias para ductos.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Analizar la documentación pertinente acerca de los tipos de sistemas de control activo de ruido.
- Caracterizar el comportamiento del prototipo construido en cuanto a su respuesta frecuencial.
- Identificar los parámetros necesarios para evaluar el desempeño del prototipo.

## **1.3 Hipótesis**

El prototipo de control activo de ruido diseñado y construido es capaz de atenuar los niveles de tonos puros de entre 100 a 500 Hz, con una atenuación de aproximadamente 20 decibelios.

## **1.4 Alcance**

Se logrará un sistema de control activo de ruido con capacidad de atenuar 20 dB el nivel de presión acústica producido por tonos puros de baja frecuencia (entre 100 a 500 Hz). mediante el análisis de la acústica dentro de un ducto de ventilación y la aplicación de retrasos para lograr sumas destructivas entre señales.

Este proyecto tiene como delimitación lograr atenuaciones globales de 20 dB mediante control activo solo aplicable en ductos, cuyas propiedades físicas serán

explicadas en el apartado de metodología de este informe. El procesamiento digital para la generación de desfases se realizará mediante el uso de una computadora y una tarjeta interface para introducir la señal de ruido.

Hay que tener en consideración que los resultados se obtendrán en condiciones controladas, por lo que los niveles medidos en lugares sin algún tipo de control acústico podrían resultar severamente comprometidos, alterando la percepción de la efectividad de dicho sistema. Estos factores también se tomarán en consideración para obtener un margen de error de su funcionamiento, y su aplicabilidad en situaciones no controladas.

### **1.5 Justificación**

A nivel nacional, existe poca evidencia acerca del desarrollo e implementación de los sistemas de control activo de ruido. Por lo tanto, resulta necesario crear una base de conocimientos y aplicaciones documentada en cuanto a estos sistemas. Y de esta manera, ampliar las opciones en cuanto al control activo de ruido implementadas al momento en el Ecuador.

Además, el análisis necesario para comprobar la eficacia de dicho sistema podría servir como base para futuras investigaciones respecto al control activo de ruido ya que es una rama de la acústica que se encuentra en vías de desarrollo.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Propagación de ondas sonoras en ductos**

Se considera un ducto recto de longitud infinita cuyas paredes internas no posean ningún revestimiento absorbente, es decir sean completamente rígidas. Si dicho ducto se excita por una fuente sonora ya sea un altavoz, ventilador, etc.,

se puede predecir el comportamiento de las ondas acústicas mediante la ecuación de onda.

Considerando que la propagación se analiza en dos dimensiones  $y$  y  $z$ , el campo sonoro generado satisface la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} = 0$$

(Ecuación 1)

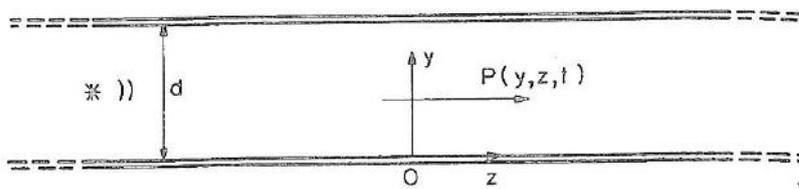


Figura 1. Propagación de la onda sonora en un ducto.

Tomado de Samir N. Y., 2000

Se aplican las condiciones de contorno de velocidad nula de las partículas en las paredes del ducto que son rígidas.

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \text{ en } y = 0 \text{ e } y = d$$

(Ecuación 2)

Además de aplicarse la condición de contorno en  $y = 0$  se tiene que:

$$P(y, z, t) = 2Ae^{i\omega t} e^{\lambda z} \cos(y\sqrt{k^2 + \lambda^2})$$

(Ecuación 3)

Donde:

- $P$  es la presión de la onda en el punto  $(y, z)$  en un instante  $t$  de tiempo.
- $A$  es la amplitud de la onda.

- $\lambda$  es un valor complejo.
- $k$  es el numero de onda.  $k = w/c$ .

Despejando el valor de  $\lambda$  y aplicando la condición de pared rígida en  $y=d$ , se tiene:

$$P(y, z, t) = 2A \cos \left[ \left( \frac{n\pi}{d} \right) y \right] e^{\pm iz \sqrt{k^2 - \left( \frac{n\pi}{d} \right)^2}} e^{i\omega t}$$

(Ecuación 4)

Donde  $d$  es el diámetro del ducto.

$P(y)$  sigue el modelo de propagación de ondas estacionarias a lo largo del ducto. Los valores de  $n$  solo pueden ser enteros positivos, para los cuales existe un modo de propagación.

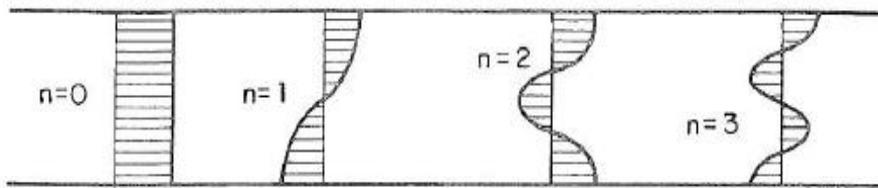


Figura 2. Transmisión de ondas sonoras en ductos, en modos de hasta tercer orden.

Tomado de Samir N. Y., 2000

Los modos se propagan en el eje  $z$  con cada número de onda dado:

$$k_n = \sqrt{k^2 - \left( \frac{n\pi}{d} \right)^2} = \frac{1}{c} \sqrt{\omega^2 - \left( \frac{n\pi}{d} \right)^2}$$

(Ecuación 4)

Por lo tanto, siempre que  $k_n$  sea un valor real, el modo  $n$  puede propagarse a lo largo del ducto. Es decir, cuándo:

$$w > \frac{n\pi c}{d}$$

(Ecuación 5)

Con esto se puede deducir que existirá una frecuencia de corte para cada valor de  $n$ . Es necesario generar solamente campo directo en el interior del ducto, es decir evitar el campo difuso. Esto se logra para todas las frecuencias en que la propagación de las ondas posea un frente plano.

Para lograr un frente plano es necesario determinar la frecuencia de corte del modo 0, pues así se evitarían las ondas estacionarias que dificultan la generación de frentes planos. Una onda plana con modo  $n=0$  se propaga sin problemas a lo largo del ducto para todas las frecuencias (Samir, 2010), debajo de:

$$f_1 = \frac{nc}{2d}$$

(Ecuación 6)

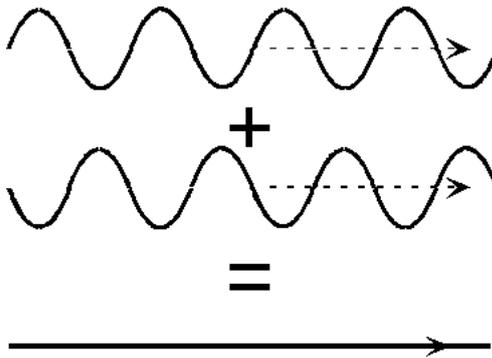
Esto resulta imprescindible al momento de diseñar el ducto pues la frecuencia de corte indica el diámetro mínimo necesario para que se puedan generar frentes de onda planos, y por consiguiente lograr interferencias destructivas de ondas acústicas dentro del ducto.

## 2.2 Control activo de ruido

### 2.2.1 Fundamentos del control activo de ruido

El control activo de ruido se basa en el principio de interferencia destructiva entre dos campos sonoros generados por una fuente primaria del ruido original y otra fuente secundaria la cual puede ser controlada. La fuente secundaria es usualmente una fuente electroacústica (altavoz dinámico).

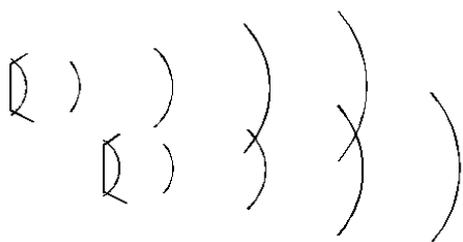
La efectividad del sistema depende de la precisión de la amplitud y fase del anti ruido generado (Forouharmajd *et al*, 2017). Por lo tanto, la variable que definirá si la suma será destructiva o constructiva será la fase. Cuando el pico de una onda se encuentra en un mismo punto en el espacio con un valle de otra onda se dice que las ondas están en desfase, y por lo tanto la onda resultante posee una amplitud inferior a la de las señales originales.



*Figura 4.* Interferencia destructiva mediante la sumatoria de ondas desfasadas. Tomado de Gibson, G., 2010

Esto es posible modificando la señal de una fuente ya sea mediante una inversión de polaridad o añadiendo un retraso físico o electrónico.

Este retraso implica que una de las señales llegará a un punto antes que otra, provocando que los picos se superpongan con un valle. Para propósitos de este proyecto, se añadirá un retraso electrónico a la señal debido a que se trabajará principalmente con tonos puros. Esto considerando la diferencia de caminos físicos que existe entre la fuente de ruido y de anti ruido. Es decir, existe un desfase inicial entre las ondas sonoras de las señales de ruido y anti ruido.



*Figura 5.* Desfase espacial entre la radiación de dos fuentes sonoras. Tomado de Gibson, G., 2010

Tomado de Gibson, G., 2010

Para lograr una interferencia destructiva, se requiere que la diferencia de caminos entre dos fuentes que reproducen un tono puro de la misma frecuencia sea de media longitud de onda o sus múltiplos impares. Esto se define mediante la siguiente ecuación (Gibson, 2010):

$$x_{canc} = \frac{\lambda}{2}(1 + 2n) [m]$$

(Ecuación 7)

Donde:

- $x_{canc}$  es la distancia en metros que se debe desplazar una fuente respecto a otra para lograr la cancelación máxima.
- $\lambda$  es la longitud de onda.
- $n$  es un número entero (1, 2, 3...).

### 2.2.2 Principios Básicos

La idea del control activo de ruido se presenta en la siguiente figura:

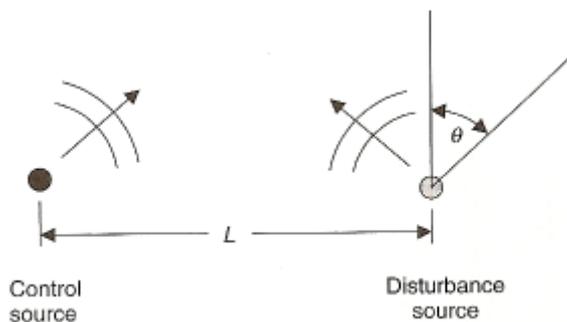


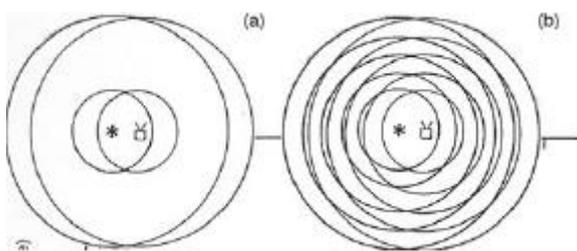
Figura 6. Desfase angular entre fuentes de control y de anti ruido.

Tomado de Tekavcic, M., 2010

Se observan dos fuentes acústicas colocadas a una distancia L de separación. La fuente de la derecha es la fuente de disturbio o de sonido indeseado. La otra

fuerza es la de control en la cual se generará el un el sonido que estará desfasado respecto al sonido de la fuente de disturbio para cancelar su señal lo más posible gracias a la interferencia destructiva entre las dos ondas.

Es aquí donde se ve la limitación básica del control activo de ruido. La cancelación del sonido irradiado en todas las direcciones es posible solo si la distancia entre la fuente de anti ruido y de disturbio es pequeña en comparación a la longitud de onda, porque las fases de los dos campos sonoros que rodean a las dos fuentes son prácticamente las mismas en cada punto en el espacio. Esto se muestra en la siguiente imagen.



*Figura 7.* Frentes de onda de las fuentes primaria y secundaria. En la figura 'a' la separación es pequeña mientras que en la figura 'b' la separación es grande en comparación con la longitud de onda.

Tomado de Tekavcic, M., 2010.

Cuando un micrófono de monitoreo el cual es encargado de medir la fuente primaria en un punto, y un altavoz que funciona como fuente secundaria están ubicados lo suficientemente cerca, tendrán un buen acople por lo que se requerirá de un pequeño voltaje de accionamiento para lograr una cancelación a ese punto. Esto significa que el nps de los puntos ubicados lejos del micrófono no se verán afectados de manera significativa.

Por lo tanto, se obtiene una zona de silencio alrededor del micrófono en la cual se logran reducciones de nivel de la fuente primaria de más de 10 [dB]. Las dimensiones de esta zona de silencio son de aproximadamente un décimo de la longitud de onda. Es decir, si se genera una señal de 120 [Hz] y considerando que su longitud de onda en temperatura ambiente es de 2.83 metros, se

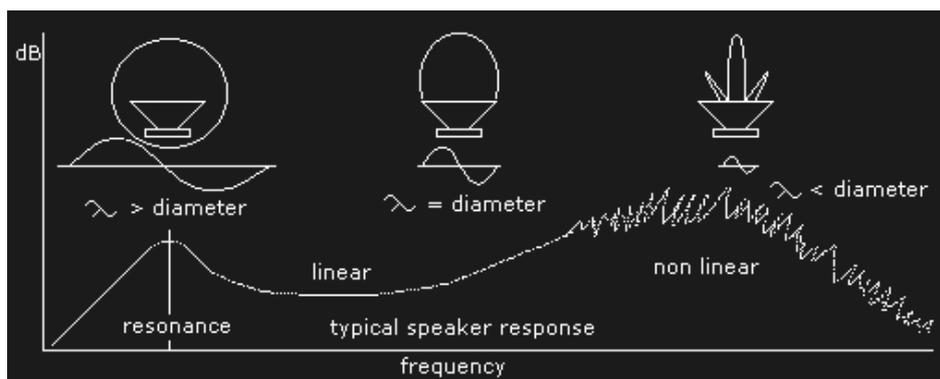
obtendría una zona de silencio de 0.28 metros. Lo cual indica que esto funciona mejor para bajas frecuencias debido a sus longitudes de onda relativamente grandes (Oddelek, 2010).

### 2.2.3 Elementos básicos para el sistema de control

Los elementos básicos para el control activo de ruido son sensores como micrófonos, Controladores tales como filtros digitales y fuentes de control, los cuales son generalmente altavoces para aplicaciones acústicas.

El elemento activo de una fuente de anti ruido podría ser utilizado para mover el cono de un altavoz, modular el flujo de aire o incluso deformar su estructura. Es necesario tener el espacio suficiente y potencia para poder tener un rendimiento adecuado de tal sistema, a esto se denomina autoridad de control suficiente (Tekavcic, 2010).

Como ejemplo, el diámetro del cono del altavoz no debe ser pequeño en comparación a la longitud de onda del sonido que éste genera. Además, la propagación de una onda acústica es un proceso lineal, a menos que su amplitud corresponda al de un sonido muy ruidoso.



*Figura 8.* Comportamiento de la radiación de un diafragma respecto a la longitud de onda que reproduce.

Tomado de Burnett, J., 2008.

La linealidad de la propagación de una onda es de suma importancia para el control activo pues es necesario que los dos frentes de onda que causen

interferencia posean las mismas características en cuanto a amplitud para que se genere la máxima cancelación posible. La mayoría de los casos de no linealidad se produce debido a falencias en el diseño del altavoz. Por ejemplo, cuando se reproducen frecuencias bajas el cono del altavoz sufre una excursión considerable lo cual puede generar armónicos de alta frecuencia. Estos armónicos no se cancelarán y será posible escucharlos.

En cuanto al procesado digital de señales se describe a la respuesta del sistema como la función de transferencia  $H(s)$ , el cual es definido como la relación de la transformada de Laplace, el cual posee señales de entrada  $X(s)$  y de salida  $Y(s)$ . esta relación se define de la siguiente manera:

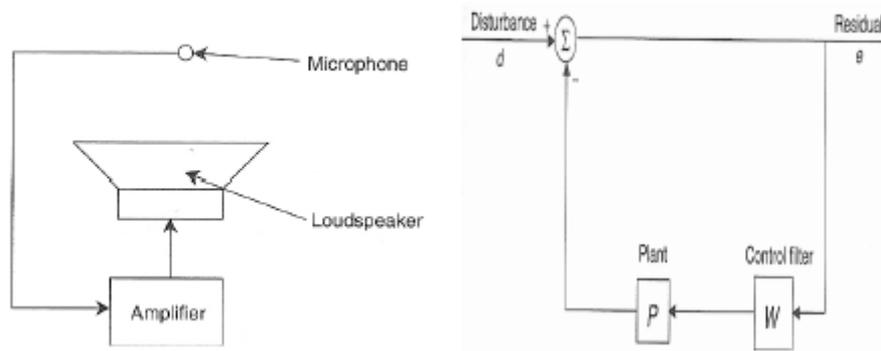
$$H(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{L(x(t))}{L(y(t))}$$

(Ecuación 8)

Un sistema de control activo es básicamente un filtro. Sus entradas son señales del micrófono y sus salidas son las señales que parten de las superficies de control. Cuando las respuestas de magnitud y fase de los filtros son funciones relativamente simples de la frecuencia, se pueden usar controladores analógicos. Sin embargo, en la mayoría de los casos, especialmente cuando se desea cambiar las características de estos filtros en el tiempo y pasa a ser un sistema adaptativo, los sistemas de control digitales ofrecen varias ventajas respecto a controladores analógicos.

#### **2.2.4 Control de retroalimentación**

A continuación, se muestra una configuración básica de un control de retroalimentación.



*Figura 9.* Izquierda: control activo de ruido básico utilizando un control de retroalimentación. Derecha: diagrama de bloques del camino de la señal. Tomado de Tekavcic, M., 2010.

En este sistema, se posee solo un micrófono conectado a un amplificador que alimenta el altavoz de control. A la derecha se observa el camino de la señal en dicho sistema. Se puede observar que se tiene un simple bucle de retroalimentación. Desde ahí, se alimenta con la señal medida con el micrófono (residual  $e$ ) hacia el filtro de control  $W$  el cual pasa a ser enviado como señal acústica ' $P$ ' hacia la señal de ruido original. Ambas señales son sumadas en el mismo punto en que se tiene ubicado el micrófono.

Con la función de transferencia del filtro  $W$ , se describe que sucede con la señal mientras esta viaja a través del recorrido eléctrico del sistema. Con la función de transferencia de la señal acústica se describe el recorrido físico de la señal. Esto depende de la respuesta del altavoz que genera el sonido de control y de cualquier efecto en la onda sonora mientras esta viaja del altavoz hacia el micrófono.

Se puede definir la función de transferencia de dicho sistema como la relación entre el disturbio (señal de ruido) y el error medido.

$$\frac{E(s)}{D(s)} = \frac{1}{1 + P(s)W(s)}$$

(Ecuación 9)

Para señales periódicas se utiliza el operador  $s = i\omega$

En el caso ideal en que la respuesta en frecuencia del recorrido físico P y el electrónico W sería relativamente plana e independiente de la inversión de polaridad, se podría utilizar un amplificador inversor simple. Esto provoca que la función de transferencia total sea muy pequeña.

En el caso real, esto no es posible de lograr. Esto debido a que la respuesta electroacústica de una bobina en movimiento de un altavoz induce cambios de fase considerables cerca de la frecuencia de resonancia mecánica.

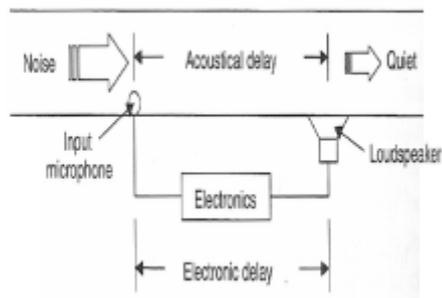
Además, algo de retraso también es algo inevitable debido al tiempo de propagación acústica entre el altavoz y el micrófono. Sumado a esto, se tiene que cuando el cambio de polaridad alcanza el valor de  $\pi$ , la retroalimentación negativa se vuelve positiva por lo que el sistema se puede volver inestable. Resultando finalmente que la amplitud de la señal de salida crezca de manera desproporcionada, amplificando incluso el ruido que se deseaba eliminar en un principio.

Mediante la adición de filtros de compensación, es posible diseñar filtros reguladores con ganancia mayor para el rango de frecuencias de trabajo. Mientras que para frecuencias fuera de este rango, la ganancia del regulador se mantiene pequeña y, por lo tanto, no se amplifica el ruido fuera del espectro deseado.

En cuanto a la estabilidad, ésta es descrita según el criterio de Nyquist, el cual en este caso indica que la fase del filtro del sistema no debería exceder el valor de  $\pi$  hasta que su magnitud sea menor a 1 (Tekavcic, 2010).

### **2.2.5 Control de compensación**

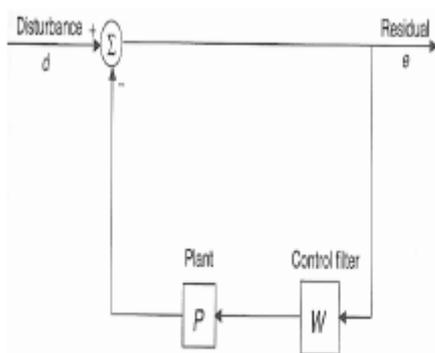
Un ejemplo básico de un sistema de control de compensación sería un sistema para controlar el sonido en un ducto, el cual se muestra en la siguiente imagen:



*Figura 10.* diagrama esquemático del uso de control activo de ruido mediante compensación en un ducto.

Tomado de Tekavcic, M., 2010.

En este modelo, se tiene un micrófono de referencia con el que se mide el ruido indeseado en algún lugar del ducto. La señal se procesa mediante elementos electrónicos apropiados para crear una señal que alimente un altavoz ubicado a cierta distancia del micrófono. En el caso de realizar un diseño correcto, el sonido del altavoz se cancela junto al ruido indeseado.



*Figura 11.* Diagrama de bloques de la señal.

Tomado de Tekavcic, M., 2010.

En el diagrama de bloques del camino de la señal, se tiene igualmente un filtro electrónico de control  $W$  y un recorrido físico de propagación de la onda, mediante el cual, la señal de referencia  $r$  del micrófono se encamina al punto en que se suma con la señal de disturbio o ruido descontrolada 'd'.

En este caso en particular, se tiene una función de transferencia que describe como la señal de ruido de referencia viaja como ondas sonoras físicas en el aire a través del ducto desde el punto en que fue medido con el micrófono de referencia hacia el punto en que alcanza el altavoz de control o anti ruido. Por lo tanto, no existe información acerca de una señal de error que se retroalimenta en el sistema, es decir, no existe un bucle de retroalimentación.

La función de transferencia de dicho sistema se describe mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{E(i\omega)}{D(i\omega)} = 1 - \frac{P(i\omega)W(i\omega)}{B(i\omega)}$$

(Ecuación 10)

La principal diferencia respecto al control de retroalimentación es que ahora se tiene una señal de referencia  $x$  por separado, la cual es utilizada con el controlador eléctrico  $W$  para alimentar la fuente secundaria. La señal de referencia debe tener una buena correlación con la fuente primaria. Pues esta provee de información por adelantado acerca del ruido original antes de que este alcance el micrófono de monitoreo.

En el caso del control armónico, la referencia eléctrica se puede obtener directamente desde la operación mecánica de la fuente primaria. Por ejemplo, se puede usar la señal del tacómetro de un motor como referencia en un silenciador activo de escape. En estos casos se controlan solo ciertos rangos de frecuencias, en contraste al control de ruido de banda ancha (Tekavcic, 2010).

En algunas ocasiones resulta útil utilizar ambos enfoques. Es decir que aparte de utilizar un micrófono de referencia, también se puede usar un micrófono para medir la señal residual, la cual se la lleva de vuelta al bucle de retroalimentación.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Diseño de sistema de tubería

Si bien existen varios tipos de ductos en el mercado, se optó por seleccionar uno de material PVC. La razón de su elección es porque es fácil de conseguir en varios diámetros, además de poseer paredes totalmente rígidas. Esta cualidad es necesaria para que el comportamiento de la propagación del sonido en el ducto sea el mismo descrito en la teoría anteriormente.

La limitación que se tiene es que es imposible elegir un diámetro exacto de tubo, puesto que solo existen unos cuantos tamaños ya preestablecidos. Esta fue la principal limitante al momento de obtener la frecuencia de corte superior pues fue determinada a partir del diámetro disponible en el mercado.

Para el diseño de este sistema, es necesario tener tres rutas esenciales en las que el sonido se propaga. Estas partes son:

- Ruta de fuente de disturbio o ruido.

Este es el camino en que se genera el campo de ruido original el cual, en el punto de vista práctico, se deriva de una fuente como un ventilador, compresor, etc. Sin embargo, para propósitos de este trabajo, la fuente de ruido primaria es un altavoz.

Es en este camino en que se coloca el micrófono que capturará la señal de ruido para luego ser procesada.

- Ruta de fuente de anti ruido o de control.

Esta es una ramificación del ducto de la fuente de ruido. El objetivo de esta ruta de fuente de anti ruido es permitir que se genere el campo sonoro de la señal desfasada, la cual deberá dirigirse hacia un punto de convergencia con la señal de fuente de ruido original.

- Ruta de convergencia de las señales de ruido y anti ruido.

Esta es la sección en la que entre las señales de ruido y anti ruido existe interferencia de ondas sonoras.

Es en esta zona en que se colocó el micrófono de error, el cual medirá los niveles generados por la interferencia destructiva entre las señales de ruido original y la de anti ruido.

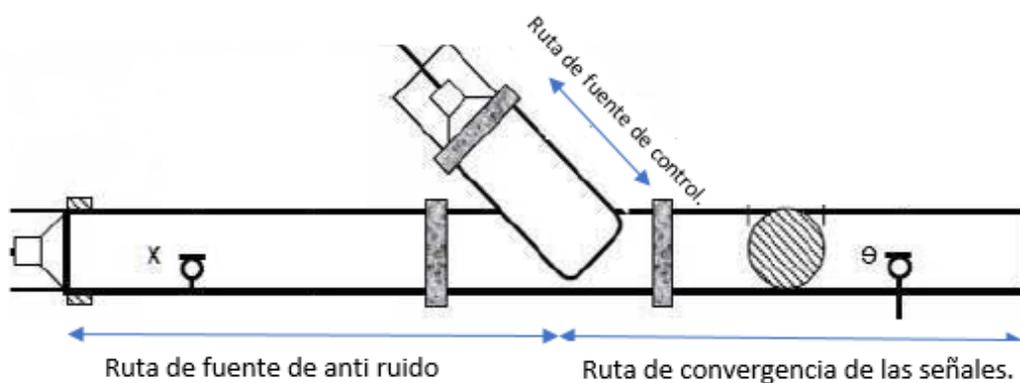


Figura 12. Rutas de las señales de ruido y de anti ruido.

Adaptado de Samir N. Y., 2000.

### 3.1.1 Diámetro del ducto

Para diseñar el sistema de tubos que consistirá el esqueleto del sistema de control activo, se comenzó por determinar el diámetro de este. Esto define la frecuencia de corte máxima hasta la cual se producen ondas planas, y por lo tanto se evita la generación de campo difuso dentro del ducto a causa de modos de orden mayor.

Otra limitante que se tiene al momento de conseguir el tubo es que su diámetro no puede ser inferior al del altavoz seleccionado, el cual debe poseer un diámetro mínimo para reproducir frecuencias bajas. Esto debido a que este sistema de

control activo de ruido está pensado para funcionar en bajas frecuencias, lo cual posee longitudes de onda mayores.

El diámetro del altavoz seleccionado es de 0.14 metros por lo que el diámetro del ducto debería tener por lo menos esas dimensiones. Dicho esto, se procedió a investigar los diámetros existentes en el mercado, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1

*Dimensiones comerciales de ductos de PVC disponibles.*

DIAMETRO NOMINAL		DIAMETRO EXTERIOR		ESPEJOR DE PARED	
pulg.	mm.	pulg.	mm.	pulg.	mm.
1 1/2	48	1.900	48.26	0.110	2.79
2	60	2.375	60.32	0.115	2.92
3	82	3.250	82.56	0.125	3.18
4	114	4.500	114.30	0.130	3.30
6	168	6.625	168.28	0.162	4.12

Tomado de Uribe, J., 2010

Se puede determinar que el ducto de 0.168 metros es el más adecuado para el sistema en cuestión. Seleccionar un diámetro menor implicaba que el altavoz no quepa en el sistema. Mientras que seleccionar un diámetro mayor resultaría en una reducción del ancho de banda en que se generan ondas planas dentro del sistema de tuberías.

Para determinar la frecuencia de corte del ducto de ese diámetro, se utilizó la siguiente relación:

$$f_1 = \frac{nc}{2d}$$

(Ecuación 11)

Sabiendo que:

- n=1 pues es el primer modo.
- c=340 m/s.

- $d=0.168$  m.

Se obtiene que la frecuencia de corte del sistema es de 1011 Hz. Esto nos da un cómodo rango de trabajo en el cual se generan ondas planas dentro del ducto y facilitará la interferencia destructiva entre las señales de ruido original y la de anti ruido.

### 3.1.2 Longitud de ducto

Puesto que en el mercado sólo se consiguen tubos de 3 metros de largo, fue necesario adquirirlo de aquella dimensión. Se procedió a cortar ese tubo en 3 partes de igual longitud (1 metro cada uno). Estas tres secciones serán cada una las rutas de encaminamiento de la señal siendo las rutas de fuente de ruido original, de fuente anti ruido y de convergencia de señales.

Para unir estas tres secciones, fue necesario implementar una 'Y' utilizada en cañerías.



*Figura 13.* Elemento 'Y' de tubo de PVC.

Es necesario que el acople entre los tres ductos y la Y sea hermético para evitar filtraciones que comprometan el rendimiento del sistema de control.

Finalmente, se consiguieron dos tapas de PVC del diámetro necesario, para acoplar los altavoces al sistema de tubos. Fue necesaria una para la fuente de

ruido y otra para la de anti ruido. En estos elementos, se perforó un agujero del diámetro del diafragma del altavoz, es decir 0.14 metros. Y finalmente se acopló el altavoz y la tapa mediante tornillos, además de colocar silicona alrededor de los límites del altavoz para evitar filtraciones fuera y dentro del sistema de control.



Figura 14. Vista frontal de acople entre altavoz y tapa de PVC.



Figura 15. Vista posterior de acople entre altavoz y tapa de PVC.



*Figura 16.* Sistema de control con acople de ductos y altavoces.

### 3.2 Diseño de cadena electroacústica

Una vez diseñado el sistema de ductos, se procedió a determinar los elementos electroacústicos necesarios para que el sistema de control funcione adecuadamente. Este es un proceso delicado pues se necesita que estos elementos distorsionen lo menos posible a la señal captada ya que es obligatorio que la señal de anti ruido posea los mismos parámetros en cuanto a frecuencia y amplitud que la de ruido original.

A continuación, se detallarán los elementos utilizados en la elaboración de la cadena electroacústica del sistema de control activo de ruido.

#### 3.2.1 Altavoces

Para la elección de los altavoces, el primer parámetro que se verifica es que este elemento electroacústico sea capaz de reproducir bajas frecuencias, a partir de 100 Hz. Además, es necesario que sus características físicas como sus dimensiones, hagan que sea fácil acoplar estos altavoces al sistema de ductos mediante las tapas de PVC. Otro factor es la facilidad de adquisición y el costo de los altavoces.

Por estas razones, se optó por los altavoces de Pioneer de modelo TS-F1034R. Estos son altavoces de dos vías diseñados principalmente para implementarlos en sistemas de audio de automóviles, lo cual hace que su instalación sea más sencilla.



Figura 17. Altavoz de dos vías Pioneer TS-F1034R.

Tomado de (Pioneer Corporation, 2018)

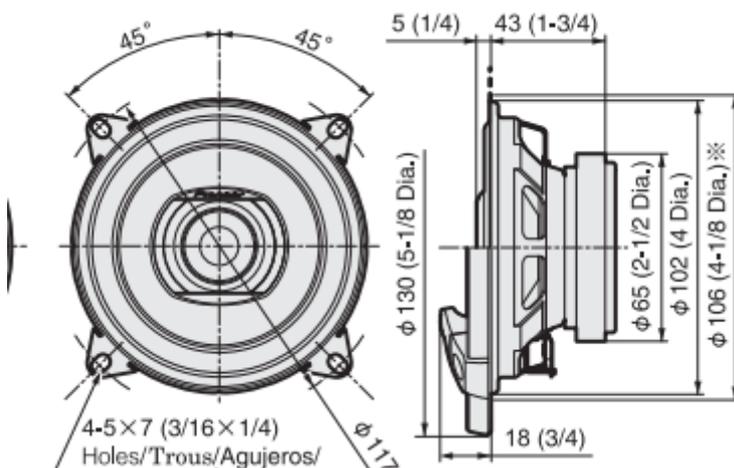


Figura 17. Dimensiones del altavoz.

Tomado de (Pioneer Corporation, 2018)

Como se observa en la ilustración, el diámetro del diafragma del altavoz es de 117 pulgadas (aproximadamente 0.11 m), por lo tanto, ese es el tamaño de la perforación a hacerse en las tapas de PVC.

A continuación, se expondrán las características principales de estos altavoces:

Tabla 2

*Especificaciones del altavoz seleccionado***● ESPECIFICACIONES**

- Sistema de reproducción ..... Coaxial de 2 vías
- Especificaciones del altavoz
  - Woofer .....  $\phi$  102 mm
    - A prueba de agua
    - Membrana de polipropileno moldeado por inyección
    - Alta elasticidad, borde laminado
    - Bobina de voz resistente al calor
    - Imán: 130 g
  - Tweeter .....  $\phi$  30 mm
- Impedancia nominal ..... 4  $\Omega$
- Sensibilidad ..... 86 dB ( $\pm$  1,5 dB)
- Respuesta de frecuencia ..... 45 Hz a 18 kHz (-20 dB)
- Máxima potencia de música ..... 150 W
- Potencia nominal ..... 20 W
- Material de la rejilla ..... Resina a prueba de calor
- Peso (por altavoz incluyendo accesorios) ..... 0,36 kg
- Peso bruto (2 altavoces incluyendo embalaje) ..... 0,86 kg

Tomado de (*Pioneer Corporation, 2018*)

Como se observa en las especificaciones, su Respuesta en frecuencia va desde los 45 Hz hasta los 18 kHz. Como se había mencionado anteriormente, es importante que el altavoz posea una buena respuesta en el espectro de bajas frecuencias, donde el control activo de ruido es más eficaz.

Además, se tiene que su sensibilidad es de 86 dB. Esto indica que estos altavoces son capaces de generar niveles de presión elevados, lo cual resulta beneficioso cuando la fuente de ruido en sí emite sonidos en niveles altos de presión.

También, se considera la potencia nominal que es de 20 W. esto es importante al momento de elegir el amplificador de audio que lo alimenta. Esa potencia es un requerimiento bastante común en amplificadores de audio que existen en el mercado. Esto convierte a estos altavoces en una opción óptima para adaptarlo a la cadena electroacústica del sistema de control activo.

### 3.2.2 Amplificador de audio

Una vez seleccionados los altavoces que se utilizarán, se escoge el tipo de amplificador cuya tarea será alimentarlos. Para el diseño del prototipo, se adquirió el amplificador de audio Kinter MA-120.

Este es un amplificador de dos canales con 20 Watts de salida. La principal razón de su elección es su respuesta en frecuencia, la cual va desde los 45 Hz hasta 180 kHz. Por lo tanto, tiene un desempeño aceptable en el rango frecuencial establecido en bajas frecuencias.

Además, debido a una distorsión por intermodulación inferior al 1%, que indica cuánto colorea la señal en su circuitería, se sabe que las características de la señal de salida serán las mismas que las de la entrada.



Figura 18. Vista frontal del amplificador Kinter MA-120.

Tomado de (Amazon.com, INC., 2018)



Figura 19. Vista trasera del amplificador Kinter MA-120.

Tomado de (*Amazon.com, INC., 2018*)

A continuación, se presentan las especificaciones del amplificador seleccionado:

Tabla 3

*Especificaciones técnicas del amplificador de audio seleccionado*

Marca	Kinter
Modelo	mA-120
Cantidad	1 pieza (s)
Color	rojo
Material	Aluminio
Clase del amplificador	AB
Función	FM / MP3
Frecuencia FM	87,5 ~ 108 MHz
Soporte de reproducción de medios	MP3 / FM
Compatible con Singles	MP3 / CD / DVD / SD / FM / USB
Respuesta frecuente	20 ~ 20K Hz
número de canales	2
Potencia de entrada	25W
Potencia máxima de salida	25W + 25W
Salida de potencia RMS	7W + 7W
Sensibilidad de entrada	200mV
Impedancia de entrada	47K
Relación Señal / Ruido	> = 85 dB
Velocidad de giro	200V / us
Voltaje de entrada	DC 12V
Impedancia del altavoz	4 ~ 16 ohmios
THD (Distorsión armónica total)	<= 0.05%
Interfaz	RCA

Tomado de (*Amazon.com, INC., 2018*).

### 3.2.3 Dispositivo con entradas y salidas analógicas.

Para el control activo de ruido, es necesario capturar el ruido provocado por la fuente primaria, para luego ser pasado por un procesamiento de desfase o inversión de polaridad. Por lo tanto, es necesario implementar un hardware capaz de recibir la señal captada con el micrófono de referencia y de enviar estas señales hacia el amplificador que finalmente alimentará al altavoz de anti ruido.

Al igual que el amplificador, es imprescindible que este dispositivo distorsione el sonido lo menos posible. Es decir, es necesario que su respuesta en frecuencia sea plana. Además, debe poseer al menos dos entradas de micrófono (XLR) y una salida de  $\frac{1}{4}$  para alimentar el amplificador. Finalmente, esta tarjeta debe contener la posibilidad de activar *phantom power* en las entradas de micrófonos, esto debido a que se utilizaran micrófonos de medición de condensador, los cuales requieren de alimentación para funcionar.

Por cuestiones de facilidad, se optó por seleccionar la interface de audio digital *M-Track Plus* de *M-Audio*. Esta interface cumple con los requerimientos mínimos anteriormente mencionados.



Figura 20. Interface *M-track Plus*.

Tomado de (*M-Audio, INC.*, 2018)

A continuación, se expondrán algunas de sus especificaciones más importantes:

Tabla 4

Especificaciones técnicas de *M-Track Plus* de *M-Audio*

Especificaciones	descripción
Velocidad de muestreo	24 bits/ 48 kHz
Entradas XLR	2 con <i>phantom power</i>
Relación señal a ruido	97 dB
THD	0.005%
Respuesta en frecuencia	+/- 0.35 dB
Entradas balanceadas de 1/4"	2 entradas de línea
Salidas balanceadas de 1/4"	1 salidas main

Adaptado de (*M-Audio, INC., 2018*)

### 3.2.4 Dispositivo generador de onda sinusoidal

En un caso práctico, la fuente de ruido emitiría sonidos complejos de banda ancha tales como los de un ventilador o tubo de escape. Sin embargo, para propósitos de este trabajo, la fuente de ruido es un altavoz alimentado por una señal sinusoidal (tono puro). Para esto, se optó por utilizar una fuente generadora de tonos puros de marca *tektronix*.

Figura 21. Dispositivo generador de funciones *Tektronix*.Tomado de (*Tektronix, INC., 2018*)

### 3.2.5 Micrófono de medición

Para captar la señal de la fuente de ruido original, es necesario hacerlo con un dispositivo electroacústico capaz de grabar su señal sin ningún tipo de coloración en alguna banda de frecuencias. Por esto, resulta útil implementar un micrófono de medición con respuesta plana. Su mayor ventaja es que al poseer respuesta plana, no amplifica ni reduce la amplitud del sonido grabado en ningún rango del espectro. Además, se opta por usar un micrófono de condensador, los cuales son reconocidos por poseer una sensibilidad mayor.

Mencionado esto, se eligió el micrófono de medición *Apex 220*.



Figura 22. Micrófono de medición *Apex 220*.

Tomado de (*Apex Electronics, INC.*, 2018)

A continuación, se muestran las especificaciones de este micrófono de medición.

Tabla 5

#### *Especificaciones técnicas de micrófono de medición Apex 220*

Type:	Test Mic
Element:	Back Elecret Condenser
Frequency Response:	20Hz - 20kHz
Sensitivity:	-63dB
Impedance:	<250 $\Omega$
Operating Voltage:	15 - 48 VDC
S/N:	>67dB
Max SPL:	105dB
Connection:	XLR-M
Dimensions:	3.75 x 0.38 in / 14.6 x 10 mm
Weight:	3.7 oz / 105 g

Tomado de (*Amazon.com, INC.*, 2018).

Como se puede observar en la tabla 5, la respuesta en frecuencia del micrófono Apex 220 funciona desde 20 Hz a 20 kHz. Esta respuesta es similar a la respuesta de los demás elementos de la cadena electroacústica lo que lo hace idóneo para esta aplicación. Además, su relación señal a ruido de 67 dB indica un buen rango dinámico de operación. Esto permite que se puedan trabajar con niveles de ruido bastante bajos, sin que el ruido inherente del micrófono comprometa el rendimiento del sistema de control por generación de armónicos indeseados.

### 3.2.6 Cables

Para el Inter conectado de los elementos que conforman la cadena electroacústica, es necesario utilizar cables de alta calidad que permitan el flujo de las señales sin ningún tipo de pérdida o coloración en sí. A continuación, se detallan los diferentes cables necesarios para el sistema de control activo.

Tabla 6

*Listado de cables con su respectiva función*

Nombre	Cantidad	Descripción	Imagen
BNC a RCA	1	Sirve para conectar la fuente generadora de funciones hacia el amplificador en una de sus entradas RCA.	
BNC a 1/4"	1	Conecta la fuente generadora de ondas hacia la interface de audio.	
1/4" TRS a RCA	1	Utilizado para conectar la salida de la interface de audio hacia la otra entrada RCA del amplificador. Es ahí donde se lleva la señal de anti ruido.	
Cable USB de interfaz de audio.	1	Conecta la interface de audio a la computadora. De esta manera ser procesadas.	

XLR	1	Conecta el micrófono a la interface de audio.	
-----	---	---	---

Adaptado de (*Amazon.com, INC., 2018*).

Tabla 7

*Presupuesto de sistema de control activo de ruido*

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Costo total
Ducto PVC de 3 metros	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Unión en forma de 'Y' PVC	1	\$ 4,00	\$ 4,00
Tapa de PVC	2	\$ 3,00	\$ 6,00
Total, sistema de ductos			\$ 60,00
Altavoces <i>Pioneer</i>	2	\$ 15,00	\$ 30,00
Amplificador Kinter MA	1	\$ 20,00	\$ 20,00
Interface de audio M-TRACK	1	\$ 120,00	\$ 120,00
Micrófono Apex 220	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Cables varios	1	\$ 25,00	\$ 25,00
Total, cadena electroacústica			\$ 245,00
Total, circuito inversor de fase			\$ 2,00
Total			\$ 307,00

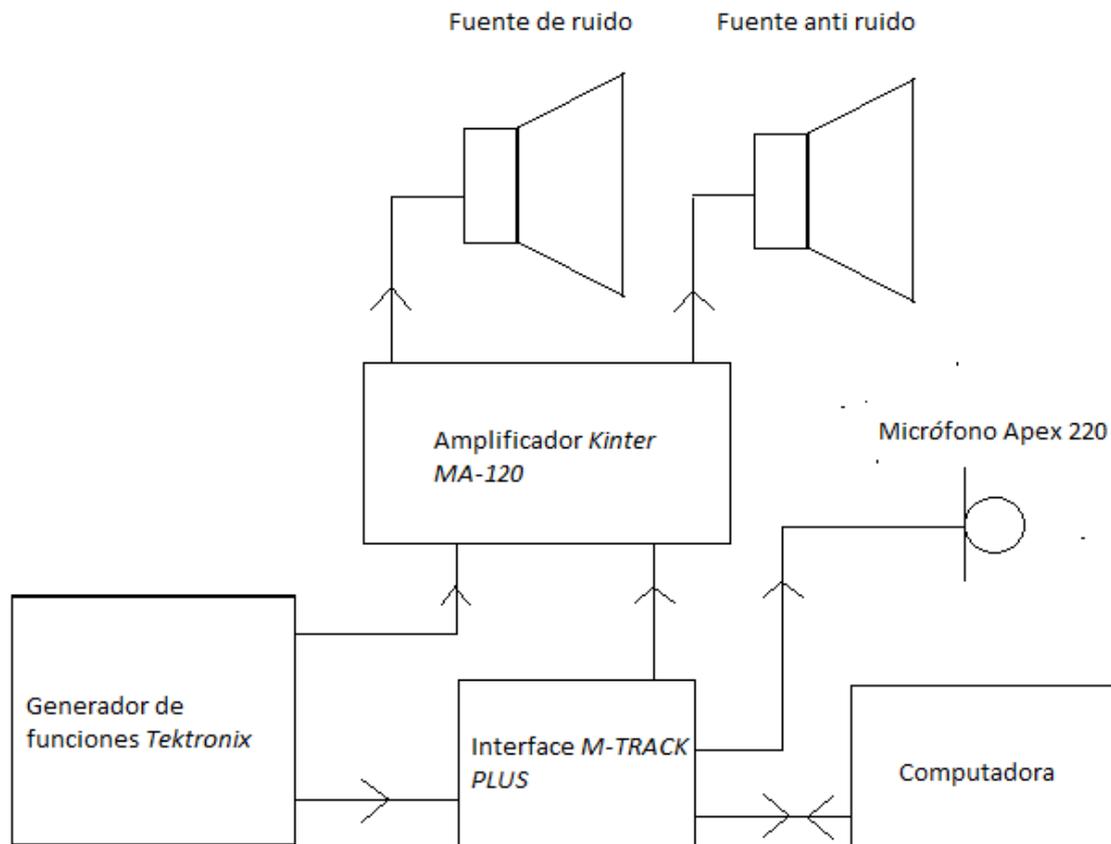


Figura 23. Cadena electroacústica de sistema de control activo de ruido.

### 3.3 Caracterización del sistema de control de ruido

A continuación, se analizarán ciertas condiciones iniciales que posee el sistema diseñado y construido. El enfoque que se da en este análisis se da principalmente a las respuestas en frecuencia de los elementos que componen al sistema. Analizar este parámetro es de vital importancia pues, como se estudió en la teoría, es necesario que la señal de anti ruido sea lo más parecida posible a la señal original de ruido. Es decir, que no existan variaciones en cuanto a amplitud en el espectro en que trabaja el sistema.

A continuación, se describirá este parámetro para varios elementos que conforman al sistema de control activo de ruido. Este procedimiento se realizó mediante el software libre *REW (Room EQ Wizard)*, el cual consistió en la generación de un barrido de frecuencias. Se utiliza un barrido de frecuencias en lugar de un ruido de banda ancha debido a que el sistema se diseñó para atenuar niveles de tonos puros, no de ruidos de banda ancha.

### 3.3.1 Respuesta en frecuencia de la tarjeta de sonido (interfaz de *audio M-track Plus*)

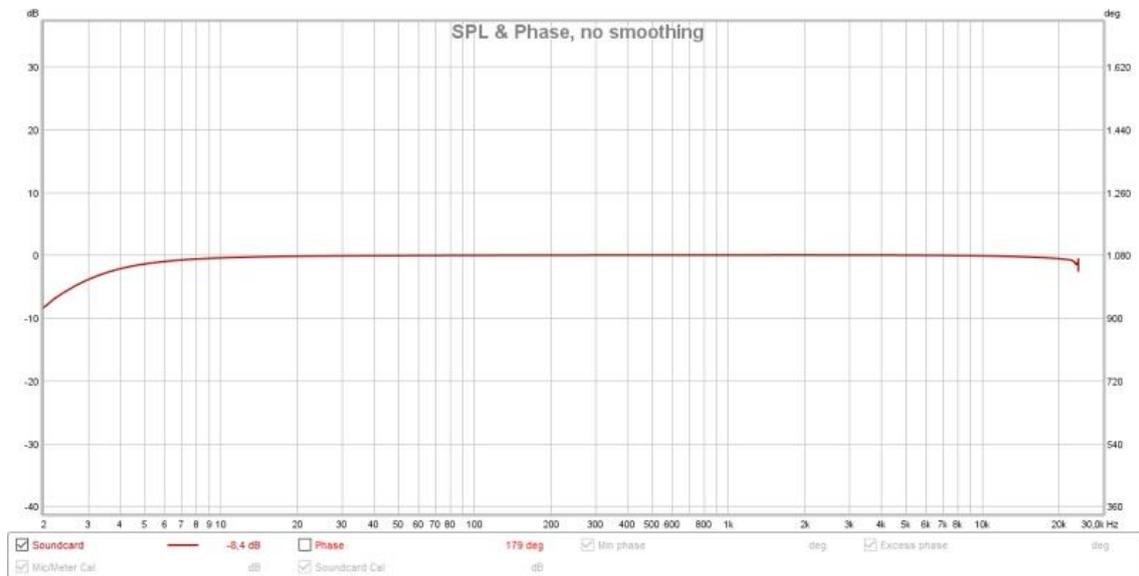
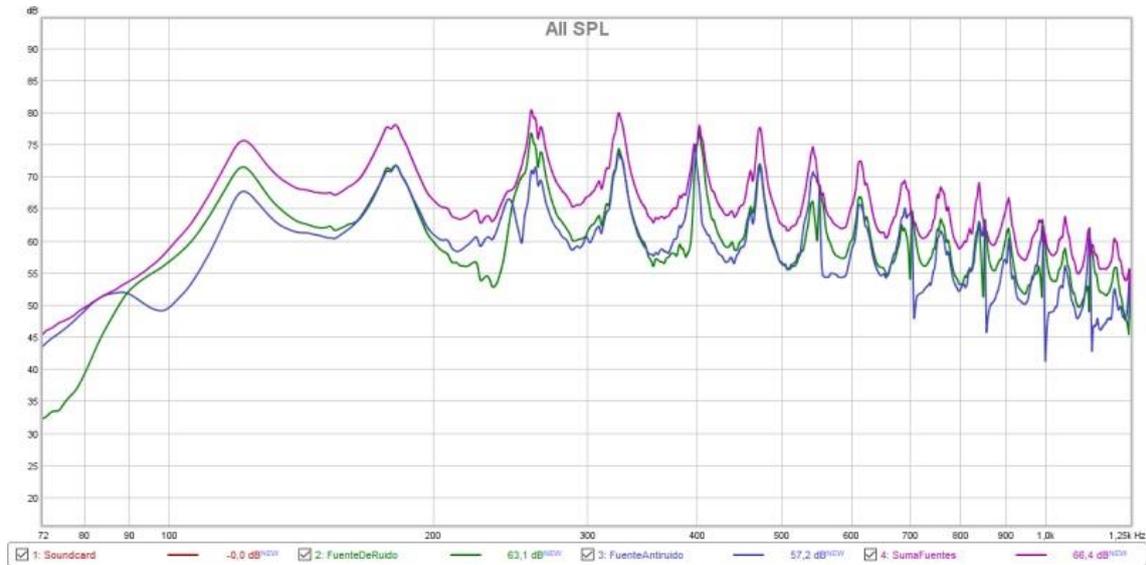


Figura 24. Respuesta en frecuencia de interface de audio.

Una parte crítica de toda la cadena electroacústica, es la tarjeta de sonido. Esto debido a que es ahí donde todas las señales analógicas son introducidas para su correspondiente procesamiento. Además de servir de puerto de salida hacia el altavoz de control. Dicho esto, resulta claro que su respuesta en frecuencia debe ser lo más plana posible. Esto es comprobado en la ilustración anterior, en que se ve que su respuesta es totalmente plana en todo el espectro de bajas y medias frecuencias que es donde el sistema tendrá su funcionamiento óptimo.

### 3.3.2 Respuesta en frecuencia de todo el sistema



*Figura 25.* Respuesta en frecuencia de las fuentes de ruido y de control.

En la figura 25, se observan las respuestas en frecuencia de la interacción de la fuente de ruido original (verde) y la fuente de anti ruido (azul) con el sistema de tuberías. Esos picos en las respuestas son de esperarse pues son generadas por resonancias que se crean por las características físicas del ducto. Sin embargo, se observa que las respuestas en frecuencia de ambas señales son prácticamente las mismas. Estas poseen variaciones de apenas 4 dB en los casos de mayor diferencia. Esto indica que ambas señales llegan al micrófono con la misma amplitud en cada banda frecuencial, lo cual es de esperarse ya que para que exista interferencia destructiva, es necesario que ambas señales que se superpongan posean las mismas cualidades en cuanto a frecuencia y amplitud. Es decir, lo único que deberá varía entre ambas señales es la fase o polaridad.

Además, se observa la respuesta en frecuencia resultado de la superposición de las señales de ruido y anti ruido (rosado). Se observa que su forma es prácticamente la misma que las señales que la componen, solo que aproximadamente 3 dB por encima de ellas. No se observan cancelaciones ni amplificaciones descontroladas en ninguna frecuencia del ancho de banda a

tratar, lo cual indica que en ese espectro las dos señales están llegando prácticamente en fase.

Una vez expuesto esto, se puede concluir que el rendimiento del sistema de control no dependerá de las condiciones iniciales del sistema de tubería o de la cadena electroacústica. Es decir, dependerá del retraso que se aplique en la señal de anti ruido para lograr las cancelaciones máximas.

### 3.4 Diseño de circuito inversor de fase

Como se menciona en la teoría, es necesario generar una inversión de fase en la señal de anti ruido para lograr las máximas atenuaciones posibles. Para propósitos de este proyecto, se diseñó un circuito inversor de fase analógico cuya entrada sea la señal de anti ruido captada con el micrófono y su salida sea esta misma señal con su fase desplazada 180 grados.

El núcleo de este circuito es el amplificador operacional LM358. Este es un dispositivo que posee dos entradas y dos salidas, capaz de amplificar dos señales por separado. Sin embargo, solo se utilizó una de sus entradas y salidas.

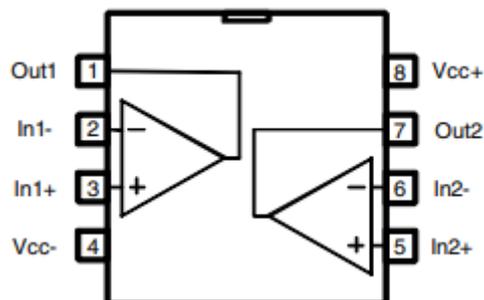


Figura 26. Conexiones de los pines del amplificador operacional LM358.

Tomado de (STMicroelectronics, 2018)

Para el diseño del prototipo, se utilizaron los siguientes pines.

- Pin 1: Aquel que conduce la señal de salida del circuito, la cual posee su fase invertida y es llevada hacia el amplificador de audio para ser reproducida por el altavoz de anti ruido.
- Pin 2: Entrada inversora. Puesto que se desea que la señal de entrada sea invertida, es ahí donde entra la señal de anti ruido.
- Pin 3: Entrada no inversora. Esta entrada se conecta a tierra puesto que la entrada principal es la inversora.
- Pin 4 y 8: Entradas de alimentación negativa y positiva respectivamente. Estos pines se conectan a una fuente de voltaje continuo para que se efectúe la amplificación en el circuito.

A continuación, se muestra el circuito inversor de fase con todos los elementos que lo componen.



*Figura 27.* Circuito inversor de fase. Tomado de Paolis, P., 2014

Como se observa en la figura 27, la entrada del circuito (señal de anti ruido), pasa por dos resistencias en serie y por el amplificador operacional, antes de generarse una señal de salida. Puesto que es un circuito operacional amplificador, La relación entre estas dos resistencias indican la ganancia que tiene la señal de salida respecto a la entrada. Sin embargo, se implementó un juego de resistencias tal que, la señal resultante no posea ningún cambio en su nivel amplitud. Es decir, la única variación respecto a la entrada es la fase de la señal resultante.

La ganancia de la señal de salida se determina la siguiente ecuación:

$$Av = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

(Ecuación 11)

Donde:

- Av es la ganancia de la señal de salida.
- Rf es la resistencia que retroalimenta a la salida.
- Rin es la resistencia conectada a la señal de entrada.

Puesto que se desea mantener la misma amplitud de la señal de entrada, se utilizaron dos valores de resistencia iguales, de 20 Kohm. Se seleccionas valores en este orden puesto que así el amplificador operacional funciona de manera más estable (Paolis, 2014).

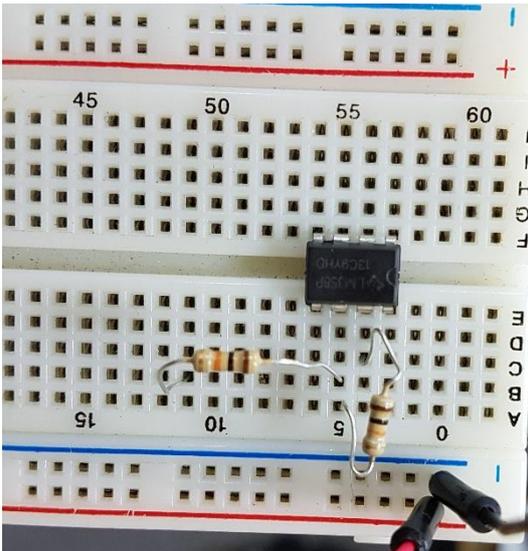


Figura 28. Circuito inversor de fase armado en *protoboard*.

### 3.5 Método de evaluación

Para la evaluación de los resultados obtenidos se determinaron los tiempos de desfase necesarios para lograr las máximas atenuaciones posibles reproduciendo las frecuencias centrales los anchos de tercio de octava comprendidos entre 100 Hz a 500 Hz

Sin embargo, existe un factor a considerar cuando se evalúa el desempeño de un sistema de procesamiento digital de señales en tiempo real. Este factor es la frecuencia de muestreo del sistema digital, el cual indica la cantidad de muestras de audio que se procesan por segundo. La frecuencia de muestreo debe ser de al menos el doble de la máxima frecuencia de interés (Farhad, Nassiri, Ahmadvand y Forouharmajd, 2017), en este caso es de 500 Hz.

Dicho esto, la frecuencia de muestreo debe de ser de por lo menos 1000 Hz. Sin embargo, el procedimiento se lo realizó con la frecuencia de muestreo de la tarjeta de sonido (M-track), es decir 41000 Hz. Por lo tanto, en este sistema se procesa una muestra de audio cada 0.022 milisegundos aproximadamente. Esto quiere decir que no es posible generar tiempos de retraso con mayor precisión que 0.022 milisegundos.

Los tiempos de desfase necesarios para las máximas atenuaciones se determinaron de manera manual, incrementando el desfase de la señal del altavoz de anti ruido en pasos de una muestra de audio, mediante el software libre *Ableton Live 8*.

Además, se realiza una comparación en cuanto a la implementación de inversión de fase en la señal de la fuente de anti ruido. Puesto que si bien, con un desfase temporal se logran atenuaciones considerables, con inversión de fases es

posible lograr las máximas atenuaciones posibles (Farhad, Nassiri, Ahmadvand y Forouharmajd, 2017).

Esta inversión de fase se realizó mediante dos métodos. El primer método es simplemente invirtiendo los cables del altavoz de la señal de anti ruido, para invertir su polaridad. Este método resulta poco práctico por lo que además se utilizó un segundo método, la inversión de fase mediante un circuito analógico.

#### 4. RESULTADOS

Los resultados principales del sistema de control activo de ruido serán expuestos a continuación.

Tabla 8

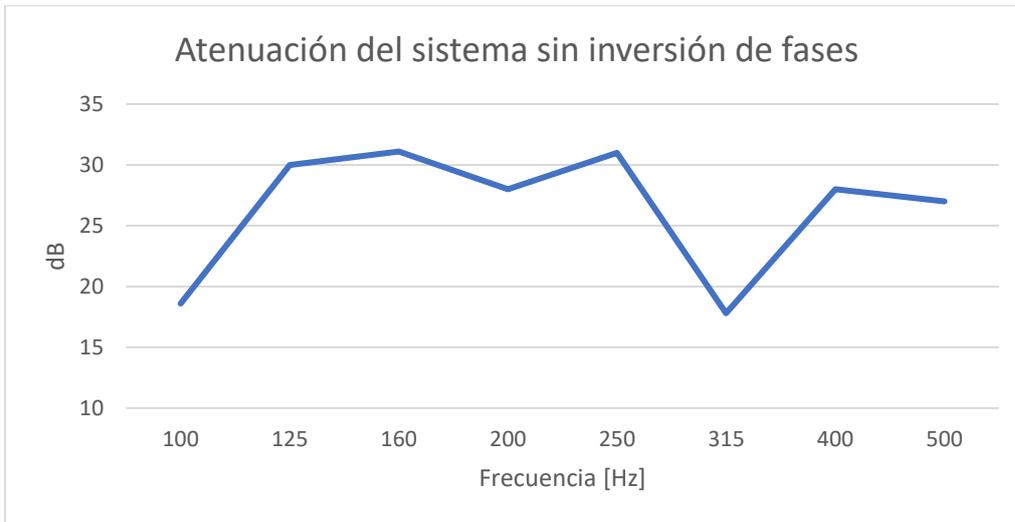
*Tiempos de retraso y sus respectivos niveles de atenuación, sin inversión de fases*

Frecuencia [Hz]	Tiempo de retraso [ms]	Atenuación [dB]
100	7	18,6
125	2,35	30
160	0,83	31,1
200	2,67	28
250	0,94	31
315	0,65	17,8
400	1,88	28
500	1,19	27

Como se observa en la tabla 7, las frecuencias en que se analiza el sistema de control van desde 100 Hz hasta 500 Hz puesto que es el rango en que más se suelen generar niveles molestos de ruido a causa ventiladores en ductos (Colombero y Sosa, 2012).

Se observa que los tiempos de retraso varían en gran medida unos de otros. Esto es debido a la precisión limitada de la frecuencia de muestreo que permite el sistema de conversión análogo-digital en la tarjeta de sonido.

A continuación, se presenta la curva de atenuación máxima del sistema de control, sin utilizar una inversión de fases en la fuente de anti ruido.



*Figura 29.* Atenuación del sistema de control activo respecto a cada frecuencia central de banda de tercio de octava, sin inversión de fases.

Como se observa en la figura 28, la pérdida por transmisión a causa del control activo posee sus mayores niveles en el rango de 125 Hz hasta 250 Hz. Esta atenuación está en el orden de los 30 dB, por lo que ese sería el rango ideal de trabajo en el caso de que la fuente de ruido genere niveles considerables en ese rango.

Sin embargo, aunque en 315 Hz se observa una caída de más de 10 dB respecto a la frecuencia anterior, su atenuación está cerca del objetivo del sistema, que es atenuar los niveles de ruido en al menos 20 dB. Esto es debido a resonancias que se producen en el interior del ducto, producto de la interacción del sistema de ductos con la superposición de las dos señales.

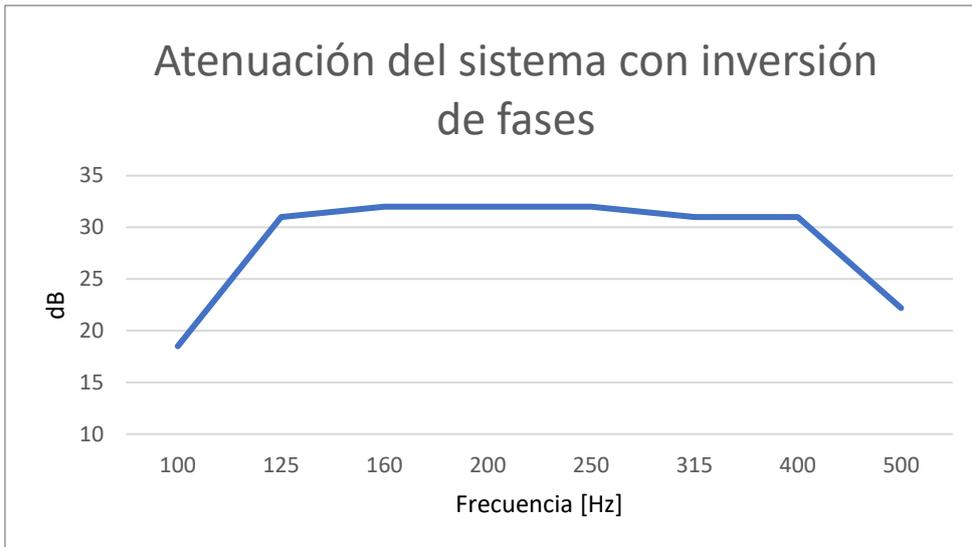
A continuación, se analiza el comportamiento del ducto utilizando una inversión de fases en la fuente de anti ruido y generando tiempos de retraso manualmente.

Tabla 9

*Tiempos de retraso y sus respectivos niveles de atenuación, con inversión de fases mediante cableado de altavoz*

Frecuencia [Hz]	Tiempo de	
	retraso [ms]	Atenuación [dB]
100	2,04	18,5
125	6,35	31
160	3,92	32
200	0,13	32
250	2,92	32
315	2,19	31
400	0,69	31
500	1	22,2

De nuevo, se observan tiempos de retraso con mucha variación entre cada banda frecuencial. Estas variaciones se dan debido a la precisión limitada del sistema digital por su frecuencia de muestreo. Puesto que, los tiempos de retraso en la señal de anti ruido poseen una precisión máxima de 0.022 milisegundos, no es posible generar los tiempos de retraso exactos para lograr las máximas atenuaciones en cada frecuencia. Es decir, los tiempos de retraso implementados en las tablas 7 y 8 se encuentran por debajo o por encima del tiempo exacto que se requiere para las máximas atenuaciones posibles.



*Figura 30.* Atenuación del sistema de control activo respecto a cada frecuencia central de banda de tercio de octava, con inversión de fases mediante el cableado del altavoz.

Se observa una curva de atenuación mucho más estable respecto a la curva sin inversión de fases. Esto es debido a que, sin inversión de fases, la superposición destructiva entre ondas se da entre ondas que están desplazadas más de una longitud de onda entre sí. Esto significa que un periodo de la onda de anti ruido se superpone con el siguiente periodo de la señal de ruido. Esta superposición debería hacerse entre los mismos periodos de cada onda, lo cual se logra mediante la inversión de fases.

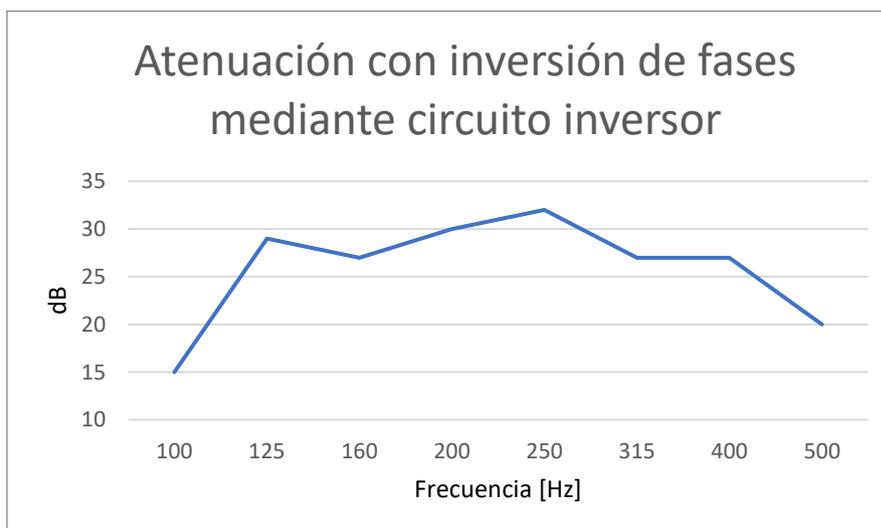
De este modo, se asegura que la onda sonora de la fuente de ruido y la de anti ruido, se interfieran en el mismo periodo, cambiando solamente la fase entre ellos.

Tabla 10

*Tiempos de retraso y sus respectivos niveles de atenuación, con inversión de fases mediante circuito analógico*

Frecuencia [Hz]	Tiempo de retraso [ms]	Atenuación [dB]
100	2,1	15
125	6,6	29
160	4	27
200	0,25	30
250	3,1	32
315	2,5	27
400	0,74	27
500	1,3	20

Como se observa en la tabla 9, los tiempos de retraso necesarios para las máximas cancelaciones están por encima de los tiempos de retraso utilizando la inversión de fase en las conexiones directas del altavoz. Esto debido a que, la señal debe recorrer un camino más largo mediante componentes electrónicos, lo que genera aún más retraso desde que las ondas sonoras son captadas por el micrófono hasta que llegan a la fuente de anti ruido.



*Figura 31. Atenuación del sistema de control activo respecto a cada frecuencia central de banda de tercio de octava, con inversión de fases mediante un circuito analógico.*

En la figura 31, se observa que los niveles de atenuación del sistema utilizando un circuito inversor de fase son menos estables respecto al método de cambiar la polaridad del conexionado del altavoz. Esto significa que la respuesta del sistema de control se ve comprometida por los dispositivos analógicos implementados en el circuito inversor.

Sin embargo, esta afectación no compromete en gran medida al objetivo del sistema de control, que es lograr atenuaciones en tonos puros de 20 dB. Se observa que, en las caídas más abruptas, existe una disminución en la atenuación de hasta 4 dB, dejando aún una atenuación de 26 dB como mínimo, en el rango de entre 125 Hz a 500 Hz.

En los 100 Hz se ve la caída de mayor importancia. El nivel de atenuación es de 15 dB, lo cual está por debajo del objetivo del sistema de control. Por lo tanto, la respuesta del sistema se ve mayormente afectada en bajas frecuencias, debido también por la interacción de la señal con los sistemas analógicos de baja calidad implementados.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Se logró realizar el diseño y construcción de un sistema de control activo de ruido para ductos de ventilación. Se ha comprobado que este sistema posee un funcionamiento de mejor rendimiento entre el rango de los 125 a 315 Hz.

Se han determinado los materiales mínimos necesarios para construir el sistema de control para que su funcionamiento sea capaz de atenuar 20 dB en los tonos del rango frecuencial establecido. Estos elementos son de fácil adquisición y no requieren de un costo monetario elevado.

Se ha comprobado que en el rango frecuencial de interés (100 a 500 Hz), el frente de onda se las señales de ruido y anti ruido fueron planas. Esto debido a las atenuaciones elevadas que se producen en ciertas frecuencias, lo cual no sería posible en el caso de que exista una superposición de ondas con frente no plano.

Esto es corroborado por las respuestas en frecuencia de las dos señales y sus sumas. En el caso de que no se esté cumpliendo los frentes de onda plana, se verían comportamientos más aleatorios en las respuestas, sin embargo, ese no es el caso.

Así mismo, Se determinó que la inversión de fases en la señal de anti ruido es necesaria si se desean lograr las máximas atenuaciones posibles. Se compararon dos métodos para la inversión de fase en la señal de anti ruido, dando como resultado un mejor comportamiento en la inversión del conexionado del sistema, respecto al uso de un circuito inversor de fase mediante un amplificador operacional.

En el caso de instalar el sistema en un ambiente que se encuentre en condiciones menos controladas que el de un laboratorio, será necesario realizar un estudio en primera instancia de la frecuencia de mayor molestia que se genere en el ducto en cuestión. El objetivo del sistema será, por ende, de atenuar principalmente aquella frecuencia que posea mayores niveles de presión,

generando una disminución considerable en los niveles globales del ruido producido.

Este sistema posee su mayor limitación en cuanto a ruidos de fondo de características complejas. Puesto que es un sistema diseñado para atenuar los niveles de presión en tonos puros, al momento de que se genere un ruido complejo en que no haya frecuencias puntuales muy por encima del nivel global, la reducción en el nivel general del ruido no será satisfactoria.

## **5.2 Recomendaciones**

Debido a efectos de practicidad, se recomienda utilizar el método del circuito inversor de fase. Por lo que es necesario utilizar dispositivos electrónicos de mayor calidad para que estos no comprometan la respuesta en frecuencia del sistema de control. Considerando principalmente, la implementación de distintos amplificadores operacionales. Puesto en estos se realiza la función crítica de invertir la fase de la señal, Considerando que unos amplificadores poseen mayor precisión que otros.

En cuanto al coste del sistema, este se podría reducir en gran medida utilizando una tarjeta de sonido de menor tamaño. Existen tarjetas de sonido dedicadas a este tipo de aplicaciones, que poseen el número exacto requerido de entradas y salidas a diferencia de la interface de audio que posee elementos que no se utilizan en este proyecto.

## REFERENCIAS

- Yasuda, T., Wu, C., Nakagawa, N. y Nagamura, K. (2013). *Studies on an automobile muffler with the acoustic characteristic of low-pass filter and Helmholtz resonator*. Recuperado el 3 de marzo del 2017 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X12001673>
- Gibson, A. (2010). *Constructive and destructive interference*. Recuperado el 2 de febrero de 2018 de [http://www.phys.uconn.edu/~gibson/Notes/Section5\\_2/Sec5\\_2.htm](http://www.phys.uconn.edu/~gibson/Notes/Section5_2/Sec5_2.htm)
- Burnett, J. (2008). *Construction and power*. Recuperado el 2 de febrero de 2018 de [http://education.lenardaudio.com/en/05\\_speakers\\_2.html](http://education.lenardaudio.com/en/05_speakers_2.html)
- Tekavcic, M. (2010). *Active noise control*. Recuperado del 3 de febrero de 2018 de <https://pdfs.semanticscholar.org/de6e/163415e1dd3c3c6f65a7cd4ee913d1ca6870.pdf>
- Gerges, S. (2000). *Ruido: Fundamentos e Controle*. Sao Paulo, Brasil: NR Editora, Florianópolis.
- Uribe, J. (2010). *Diámetro de Tuberías Sanitarias PVC- RALCO*. Recuperado el 2 de febrero de 2018 de <http://tecnologiasenconstruccion.blogspot.com/2010/07/diametro-de-tuberias-sanitarias-pvc.html>
- Behera, S., Das Prasad, D. y Subudhi, B. (2017) *Adaptive nonlinear active noise control algorithm for active headrest with moving error microphones*. Recuperado el 3 de marzo del 2017 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X16305825>
- Chengcheng. G., Yumei, W., Ping, L., y Jing, W. (2016) *Adaptive noise cancellation based on EMD in water-supply pipeline leak detection*. Recuperado el 3 de marzo del 2017 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224115005151>
- Hu, S., Rajamani, R. y Yu, Xun. (2012). *Invisible speakers in home windows for simultaneous auxiliary audio playback and active noise cancellation*. Recuperado el 3 de marzo del 2017 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415812001079>
- Kim, C., Chol, J. y Xiaotong, Z. (2017). *Enhancement of noise reduction efficiency based on compensation in the ANC Headset using*

*Fixed-point DSP*. Recuperado el 3 de marzo del 2017 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X16303097>

Kurian, N., Patel, K. y George, N. (2017). *Robust active noise control: An information theoretic learning approach*. Recuperado el 3 de marzo del 2017 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X16303802>

Li, P. y Yu, X. (2013). *Active noise cancellation algorithms for impulsive noise*. Recuperado el 3 de marzo del 2017 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327012003901>

Nabelek, A.K., Freyaldenhoven, M.C., Tampas J.W., Burchfield, S.B., y Muenchen, R.A. (2006). *Acceptable noise level as a predictor of hearing aid use*. Recuperado el 3 de marzo del 2017 de [https://www.audiology.org/sites/default/files/journal/JAAA\\_17\\_09\\_02.pdf](https://www.audiology.org/sites/default/files/journal/JAAA_17_09_02.pdf)

Tanaka, K., Shi y Chuang.(2017). *Binaural active noise control using parametric array loudspeakers*. Recuperado el 3 de marzo del 2017 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X16302961>

