

Reducción de ruido acústico generado por una unidad de supercómputo en el Centro Colombiano de Computación Avanzada a partir del principio de cancelación activa de ruido.

Andres Felipe Arenas Chaparro

Yuneiry Carolina Correa Rodríguez

Carlos Fuentes Herrera

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Electrónico

Director

Rodolfo Villamizar Mejía

Doctor en Tecnologías de la información

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2018

Dedicatorias

Primero que todo quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de culminar mi carrera profesional, gracias por estar siempre conmigo y bendecirme en cada momento. Gracias a doña Sara mi madre, yo sé que para ella este logro es muy importante, porque en mi ve todo el esfuerzo que ha dedicado para sacarme adelante al igual que mi padre siempre estuvieron conmigo para apoyarme y gracias a ellos pude lograr ser la persona que hoy en día soy.

A toda mi familia, a mi abuela Ligia muchas gracias, mi segunda madre nunca me abandono y siempre creyó en mí. Este logro es para ella, porque sé que al igual que yo, está muy orgullosa por cumplir esta gran meta en mi vida.

Gracias a ella, mi compañía, mi guía, mi novia y amiga, Paola Avila, la que siempre estuvo conmigo y creyó en mí. Este triunfo es gracias a ti por siempre levantarme en los momentos difíciles y devolverme las fuerzas para seguir adelante.

A todas las personas que colaboraron en este proyecto, a nuestro guía el Rodolfo Villamizar por darnos el camino a seguir, a mis compañeros y amigos que estuvieron presentes muchas gracias.

Andres Arenas, ingeniero electrónico UIS

A Dios por ser el artífice de las oportunidades que la vida me presenta, por ser mi guía espiritual y permitirme culminar con éxito esta etapa tan maravillosa llena de retos, aprendizajes y lecciones.

A mi madre Alix Rodríguez por ser la mujer más maravillosa y hacer posible este sueño, por todos sus sacrificios y apoyo incondicional, por sus enseñanzas que han sido la base fundamental de mi proceso de formación tanto personal como académico, gracias madre porque todo lo que soy, mis logros y metas son por ti, te amo mami.

A mi padre Pedro Correa, mis hermanos Daniela y Yesid por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, por su cariño y por enseñarme a valorar el significado de la palabra unión porque se que donde sea que la vida me lleve ellos estarán siempre conmigo, como yo estaré con ellos.

A mi novio y amigo James Castañeda por compartir conmigo y brindarme apoyo durante todo este proceso y el tiempo que me ha permitido estar junto a él, por todas las alegrías y el amor brindado, por ser ese compañero de risas y por todos los momentos a su lado.

A mi nonita Eusebia Leal y mi madrina Sasha, por todo el apoyo y ayuda brindada durante esta etapa de mi vida, por inspirarme a ser mejor persona y a luchar por mis sueños.

A Andres Arenas por ser un excelente compañero de proyecto, por la paciencia, comprensión, trabajo y dedicación.

A toda mi familia, amigos, compañeros y demás personas que me han acompañado a lo largo de mi vida, por su amistad, confianza y apoyo, por cada palabra de aliento y los momentos compartidos.

Carolina Correa Rodríguez.

El esfuerzo puesto en este trabajo y durante el transcurso de la carrera es dedicado con todo mi amor y respeto a la persona que más quiero, así como tú has dedicado cada segundo de tu vida para mi bienestar yo he querido hacerte sentir orgullosa. Te quiero mucho *madre mía*.

Le agradezco a dios tener a mi mama con vida, para poder compartir este nuevo logro primeramente por permitirme tener un nuevo logro y poderlo compartir con diversas personas, pero sobre todo con mi mamá.

Especialmente le agradezco a mi mama por los momentos compartidos, el apoyo incondicional, el cuidado que me ha dado durante tanto tiempo, por todas esas pequeñas cosas que no siempre valoramos pero que las haces con mucho amor, en realidad te agradezco simplemente por estar a mi lado eres la mejor persona que conozco y poder compartir este logro contigo ha sido el mejor regalo que la vida me ha dado, espero hacerte sentir muy orgullosa señora gloria.

Le agradezco a mi hermana y sobrina por esos momentos que me han cuidado, por todas esas sonrisas, peleas y cuidados que tenemos espero que siempre podamos contar el uno con el otro y hacer de mi sobrina una gran persona.

Le agradezco a esas personas con las que siempre he contado especialmente a Erika y Karen, que con cuyas presencias siempre me han ayudado y apoyado en todo momento, espero que, aunque cada uno coja caminos diferentes comportamos más sonrisas y apoyemos en los momentos difíciles.

Carlos A. Fuentes H.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos:

A Dios por permitirnos culminar esta etapa con éxito.

A nuestro director de proyecto Dr. Rodolfo Villamizar Mejía por ser un apoyo y guiarnos con paciencia en la realización de este trabajo.

A nuestras familias por darnos el apoyo en todo momento y siempre creer en nosotros.

A todas las personas que influyeron para el desarrollo y culminación de nuestro proyecto de grado.

Contenido

	Pág.
Introducción	21
1. Objetivos	22
1.1 Objetivo General	22
1.2 Objetivos Específicos.....	22
2. Generalidades.....	23
2.1 Planteamiento y justificación	23
2.2 Antecedentes	24
3. Marco conceptual.....	26
3.1 Conceptos Básicos	26
3.1.1 Sonido.	26
3.1.2 Ruido Acústico.....	26
3.1.3 Espectro de frecuencias audibles	28
3.1.4 Propagación de ondas acústicas en ductos.....	28
3.2 Transductores electroacústicos	30
3.2.1 Micrófonos.....	30
3.2.2 Características técnicas de los transductores electroacústicos.....	31
3.2.3 Altavoces.....	33
3.2.4 Características técnicas de los altavoces.....	34

3.3 Control activo de ruido	35
4. Caracterización del espacio físico de ruido acústico	37
4.1 Espacio de trabajo	37
4.2 Medición del nivel de ruido	39
4.3 Modelo dinámico	42
5. Modelo de atenuación de ruido propuesto	43
6. Diseño de experimentos	45
6.1 Prueba 1	46
6.2 Prueba 2	46
6.3 Prueba 3	47
6.4 Prueba 4	48
6.5 Prueba 5	49
6.6 Prueba 6	50
6.7 Prueba 7	51
6.8 Prueba 8	52
6.9 Prueba 9	53
6.10 Prueba 10	54
6.11 Prueba 11	55
7. Resultados experimentales	57
7.1 Prueba 1	57
7.2 Prueba 2	59
7.3 Prueba 3	60
7.4 Prueba 4	62

7.5 Prueba 5	63
7.6 Prueba 6	64
7.7 Prueba 7	65
7.8 Prueba 8	66
7.9 Prueba 9	68
7.10 Prueba 10	69
7.11 Prueba 11	71
8. Análisis de resultados	75
8.1 Prueba 1	75
8.2 Prueba 2	75
8.3 Prueba 3	76
8.4 Prueba 4	76
8.5 Prueba 5	77
8.6 Prueba 6	77
8.7 Prueba 7	78
8.8 Prueba 8	78
8.9 Prueba 9	79
8.10 Prueba 10	79
8.11 Prueba 11	80
9. Conclusiones	80
10. Trabajo futuro	81
Referencias Bibliográficas	83
Apéndices.....	85

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Ruido ambiente	58
Tabla 2 Ruido total.....	58
Tabla 3 Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 9 cm.....	58
Tabla 4 Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 0 cm.....	58
Tabla 5 Ruido total.....	59
Tabla 6 Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 30cm.....	59
Tabla 7 Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 0 cm.....	59
Tabla 8 Ruido total.....	61
Tabla 9 Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 5cm.....	61
Tabla 10 Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 0cm.....	61
Tabla 11 Comparación de las señales obtenidas en los sensores 1 y 2.....	71
Tabla 12 Comparación de las señales obtenidas en los sensores 1 y 2.....	75

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Sistema de Cancelación.....	24
Figura 2. Propagación de la onda sonora en el ducto.	29
Figura 3. Respuesta en frecuencia de un micrófono.....	32
Figura 4. Diagrama polar cardioide.....	33
Figura 5. Sistema de control feedback.....	36
Figura 6. Sistema de control feedforward.....	36
Figura 7. Sistema de control general.....	36
Figura 8. Estructura básica del supercomputador (Fuente de ruido).	37
Figura 9. Plano de vista superior del área de trabajo.	38
Figura 10. Sonómetro.....	40
Figura 11. Potencia del ruido a diferentes capacidades de operación.....	40
Figura 12. Diagrama de bloques del sistema de control	42
Figura 13. Sistema de control feedforward.....	44
Figura 14. Configuración 1.....	46
Figura 15. Configuración 2.....	47
Figura 16. Configuración 3.....	48
Figura 17. Configuración 4.....	49
Figura 18. Configuración 5.....	50

Figura 19. Configuración 6.....	51
Figura 20. Configuración 7.....	52
Figura 21. Configuración 8.....	53
Figura 22. Configuración 9.....	54
Figura 23. Configuración 10.....	55
Figura 24. Imagen real configuración 10.....	55
Figura 25. Configuración 11.....	56
Figura 26. Imagen real configuración 11.....	56
Figura 27. Respuesta en frecuencia de ruido de la grabación del supercomputador analizada en Matlab.....	57
Figura 28. Respuesta en frecuencia de las señales original y desfasada 180 grados.....	57
Figura 29. Respuesta en frecuencia del ruido total (tono de 1 kHz de frecuencia).....	60
Figura 30. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas en la zona de cancelación a una distancia $d_1 = 30$ cm.....	60
Figura 31. Respuesta en frecuencia del ruido total (tono de 1 kHz de frecuencia).....	61
Figura 32. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas en la zona de cancelación, con una distancia $d_1 = 5$ cm.....	62
Figura 33. Respuesta en frecuencia del ruido de la grabación obtenida del supercomputador. ...	62
Figura 34. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas en la zona de cancelación, a una distancia $d_1 = 5$ cm.....	63
Figura 35. Respuesta en frecuencia producida por un secador, sensado en el punto A (azul) y en punto B (roja) de la tubería.....	63

- Figura 36. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas a una distancia $d_1=76\text{cm}$. Sensado en el punto A (azul) y en el punto B (roja) de la tubería.64
- Figura 37. Respuesta en frecuencia del ruido generado por el secador sensando en el punto A (azul) y en el punto B (roja) de la tubería.64
- Figura 38. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas a una distancia $d_1=76\text{ cm}$. Sensando en el punto B de la tubería.65
- Figura 39. Respuesta en frecuencia del ruido generado por el secador sensando en el punto A (azul) y en el punto C (roja) de la tubería.65
- Figura 40. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas utilizando conexión Y a una distancia $OC=65\text{cm}$. Sensando en el punto A(azul) y en el punto C (roja) de la tubería.66
- Figura 41. Respuesta en frecuencia del ruido generado por el secador sensando en el punto A(azul) y en el punto C (roja) de la tubería.66
- Figura 42. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas utilizando conexión Y e inversor a una distancia $d_1=76\text{cm}$. Sensando en el punto A(azul) y en el punto C (roja) de la tubería.67
- Figura 43. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas utilizando conexión Y e inversor a una distancia $OC=65\text{cm}$. Sensando en el punto C (roja) de la tubería. .67
- Figura 44. Respuesta en frecuencia del ruido generado por el secador con salida de aire, sensando en el punto A (azul) y en el punto C (roja) de la tubería.68
- Figura 45. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas utilizando salida de aire e inversor a una distancia $OC=13\text{cm}$. Sensando en el punto C (roja) de la tubería.68

Figura 46. Espectro del ruido generado por el supercomputador en los puntos A (azul) y C (roja).
69

Figura 47. Frecuencia del ruido generado por el supercomputador en los puntos A (azul) y C
 (roja).....69

Figura 48. Resultados del algoritmo de control implementado en el supercomputador.....70

Figura 49. Gráfica comparativa de atenuación en el sensor 170

Figura 50. Gráfica comparativa de atenuación en el sensor 271

Figura 51. Ruido generado por el Supercóputador en los puntos A (azul) y C (roja).72

Figura 52. Ruido generado por el Supercóputador en los puntos A (azul) y C (roja).72

Figura 53. Resultados del algoritmo de control implementado en el supercomputador con tres
 sistemas acoplados medidas en el punto A (azul) y C (roja).73

Figura 54. Resultados del algoritmo de control implementado en el supercomputador con tres
 sistemas acoplados medidas en el punto A (azul) y C (roja).73

Figura 55. Gráfica comparativa de atenuación en el sensor 174

Figura 56. Gráfica comparativa de atenuación en el sensor 274

Figura 57. Implementación completa de un sistema de control para múltiples fuentes de ruido
 iguales.82

Figura 58. Circuito del sistema de control implementado.85

Figura 59. Circuito impreso del controlador.....86

Figura 60. Hoja de datos micrófono electret MO093803-2.....87

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Circuito de control implementado.	85
Apéndice B. Circuito impreso.....	86
Apéndice C. Datasheet micrófono electret.	87

Resumen

TÍTULO: REDUCCIÓN DE RUIDO ACÚSTICO GENERADO POR UNA UNIDAD DE SUPERCÓMPUTO EN EL CENTRO COLOMBIANO DE COMPUTACIÓN AVANZADA A PARTIR DEL PRINCIPIO DE CANCELACIÓN ACTIVA DE RUIDO*

AUTOR: ANDRES FELIPE ARENAS CHAPARRO, YUNEIRY CAROLINA CORREA RODRÍGUEZ, CARLOS ALBERTO FUENTES HERRERA**

PALABRAS CLAVE: ANC, ATENUAR, CONTROL, RUIDO ACÚSTICO.

DESCRIPCIÓN:

En este proyecto se aplica la teoría de control activo de ruido acústico (ANC), que permite atenuar ruidos de bajas frecuencias por medio de una implementación de control donde se genera una señal de fase invertida que es atenuada.

El principal objetivo es implementar un sistema de control activo de ruido acústico en tiempo real para la unidad de supercómputo ubicada en la sede Parque Tecnológico Guatiguará de la UIS, que atenúa las componentes espectrales de baja frecuencia del sonido proveniente del sistema de extracción de calor. Para esto se diseñó una caja acústica compuesta por ductos que encierran la onda y redireccionan el sonido, permitiendo encontrar el modo cero logrando frente de ondas planos para lograr la atenuación de la señal. Teniendo en cuenta la función principal del sistema de ventilación de extracción de calor se diseñó un ducto de salida de aire.

El algoritmo de control presentado se diseñó utilizando electrónica analógica compuesta por un circuito inversor de fase. El controlador cumple unos parámetros de diseño en el que es importante tener en cuenta la distancia de propagación de ondas, por tal motivo es necesario conocer la frecuencia de operación del ruido y determinar la zona de atenuación.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Rodolfo Villamizar Mejía, Doctor en Tecnologías de la información.

Abstract

TITLE: ACOUSTIC NOISE REDUCTION GENERATED BY A SUPERCOMPUTER IN THE COLOMBIAN ADVANCED COMPUTING CENTER BASED ON THE PRINCIPLE OF NOISE CANCELLATION*

AUTHOR: ANDRES FELIPE ARENAS CHAPARRO, YUNEIRY CAROLINA CORREA RODRÍGUEZ, CARLOS ALBERTO FUENTES HERRERA**

KEYWORDS: ANC, attenuate, control, acoustic noise.

DESCRIPTION:

The theory of active acoustic noise control is applied in this project, which allows attenuating low frequency noise by means of a control implementation where an inverted and attenuated phase signal is generated.

The main objective is to implement an active system of acoustic noise control in real time generated by the fans that make up the forced ventilation system of the supercomputer located in the Technology Park of Guatiguara., which attenuates the low frequency spectral components of the sound coming from the heat extraction system. In order to do so, an acoustic box composed of ducts that enclose the wave and redirect the sound was designed, allowing to find the zero mode by achieving plane wave front for attenuation. Considering the main function of the heat extraction ventilation system, it was also necessary to implement an air outlet duct.

This control algorithm was designed using the analog electronics of a phase inverter circuit. The controller complies with the design parameters in which it is important to take into account the propagation distance of the wave, so it is necessary to know the frequency of the noise operation, once all the parameters have been obtained it is possible to determine the attenuation zone.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Rodolfo Villamizar Mejía, Doctor en Tecnologías de la información

Introducción

La contaminación acústica se describe por Martínez Llorente y Peters (2015) como:

La presencia en el ambiente de ruidos o vibraciones, cualquiera que sea el emisor acústico que los origine, que impliquen molestia, riesgo o daño para las personas, para el desarrollo de sus actividades o para los bienes de cualquier naturaleza o que causen efectos significativos sobre el medio ambiente (p.13). La exposición constante a altos niveles de ruido puede causar desde dolor auditivo hasta daños en el sistema auditivo, existen diferentes resoluciones como la 1792 de 1990 y 8321 de 1983 que reglamentan el tiempo permitido de exposición según su nivel sonoro relacionado (Casas García, Betancur Vargas, y Montaña Erazo, 2015).

Para nuestro caso específico el ruido acústico que se genera por la unidad de supercómputo de la universidad tiene una gran amplitud que llega a afectar las actividades realizadas en dicho laboratorio y sus oficinas contiguas, es por tal motivo que se desea realizar un primer prototipo capaz de reducir a un buen nivel el ruido resultante. Este prototipo tendrá un dispositivo capaz de procesar la información obtenida en tiempo real por el sensor (micrófonos capacitivos) y arrojar una señal debidamente procesada al emisor que completará el circuito de compensación.

Una técnica ampliamente reportada en la literatura para atenuar el ruido es la cancelación activa de ruido (ANC-*Active Noise Control*) como afirma Tekavčič (2010-2011):

El control activo de ruido es un método para reducir el sonido no deseado en el medio ambiente utilizando la interferencia destructiva entre campos de sonido generados por fuentes primarias del

ruido original y fuentes secundarias que pueden ser controladas y son usualmente altavoces de bobina móvil controlados por una señal eléctrica (p.1).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General.

Disminuir ruido acústico en una zona específica del centro colombiano de computación avanzada de la UIS, generado por el sistema de ventilación forzada de la unidad de supercómputo principal; aplicando el principio de control activo de ruido.

1.2 Objetivos Específicos.

- Obtener el perfil del ruido acústico generado por el sistema de ventilación forzada de la unidad de supercómputo principal de la UIS, para diferentes porcentajes de uso respecto a su capacidad nominal.
- Definir la arquitectura e instrumentar el sistema de control, con el fin de obtener un modelo experimental de la dinámica del ruido acústico y del sistema de actuación en el punto de cancelación de ruido de interés para el centro.
- Diseñar la estrategia de control activo, a partir del modelo dinámico obtenido e implementarla en una unidad de cómputo.

- Validar experimentalmente el algoritmo de cancelación activa de ruido en un punto específico de la sala de supercómputo durante al menos un día, a partir del sistema de control propuesto.

2. Generalidades

2.1 Planteamiento y justificación

De acuerdo con Cabrera Ortiz (2010):

El ruido acústico es aquel ruido (entendido como sonido molesto) producido por la mezcla de ondas sonoras de distintas frecuencias y distintas amplitudes. La mezcla se produce a diferentes niveles ya que se conjugan tanto las frecuencias fundamentales como los armónicos que las acompañan (p.51).

Budde (2013) afirma:

Los ruidos de banda angosta se caracterizan por ser determinísticos o cuasi-determinísticos del tipo periódicos. Se dice que son cuasi-determinísticos ya que en la realidad las características de los ruidos no permanecen constantes, sino que varían lentamente. Sin embargo, como esta variación se produce en un tiempo mayor a los tiempos involucrados en un sistema de control activo, se puede considerar a estos ruidos como determinísticos para su análisis en dicho sistema. Una característica fundamental de las señales determinísticas es que su comportamiento es predecible en el tiempo. Un ejemplo muy común de ruidos de banda angosta es el de los ruidos de

baja frecuencia producidos por máquinas de rotación, tales como ventiladores, motores compresores o turbinas (p.15).

El ruido analizado en este proyecto es producido por el sistema de refrigeración del Supercomputador de la UIS ubicado en la sede Parque tecnológico de Guatiguará. Este es un tipo de ruido continuo de baja frecuencia, cuya intensidad genera molestias en las salas contiguas debido a su alta amplitud.

La metodología para abordar este problema se desarrolla a partir del principio de cancelación activa de ruido, donde se implementa un sistema ANC. Esto se logra sensando la señal de interés y aplicando una acción de control que permita enviar la señal de cancelación por un emisor para obtener un punto de atenuación de ruido en un lugar determinado.

2.2 Antecedentes

El teorema del control activo de ruido se remonta a 1936 cuando Paul Lueg científico alemán registró la primera patente de un sistema de control activo de ruido implementado al interior de un conducto como se muestra en la *Figura 1*.

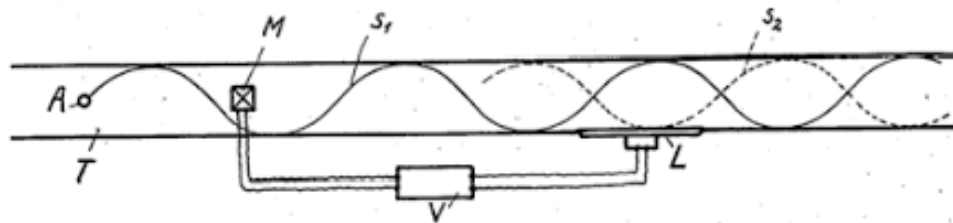


Figura 1. Sistema de Cancelación. Adaptado de (Estados Unidos Patente nº 2.043.416, 1936).

La base fundamental de la patente de Paul se basa en generar una señal inversa a la señal de ruido con el fin de poder cancelarlas en un punto determinado del ducto. Este esquema, sería la base fundamental para el control activo de ruido usado por Harry f. Olson en 1956 para diseñar un sistema de control acústico para atenuar interferencias alrededor del reposacabezas del pasajero de un avión o automóvil. El sistema consiste en un lazo de control conformado por un micrófono, un amplificador y un altavoz. El micrófono y el altavoz fueron ubicados de tal forma que el micrófono recibe la onda acústica y envía al amplificador para ser invertida y enviada al altavoz y así producir un campo de cancelación activa de ruido en la cabecera del asiento (Sánchez y Sánchez Remón, 2016).

Más adelante en 1957 Conover fue el primero en analizar esta técnica de control en 3 tipos de superficies: ondas esféricas, conductos de ondas planas y auriculares de protección auditiva (Mínguez Olivares, 1998). Siguiendo con su investigación Conover presentó la cancelación activa de ruido en las estaciones eléctricas causado por los generadores de alta potencia, donde estos generaban ruido puramente periódico y su idea fue generar ondas sinusoidales de la misma frecuencia emitida por el transformador y variar su amplitud y fase, para poder conseguir la mayor reducción de presión acústica en un determinado punto (Sánchez y Sánchez Remón, 2016).

Durante los primeros años la tecnología existente no era suficiente para llevar a la práctica las ingeniosas ideas de sus autores. Es por este motivo que durante un largo tiempo no se lograron avances sobre el tema hasta que se empezaron a diseñar técnicas de procesamiento digital de señales en los años 60 y 70. Fue gracias a que Alan V. Oppenheim dio grandes avances en el procesamiento adaptativo de señales, además del vertiginoso desarrollo tecnológico de los procesadores digitales de señal, lo que permite hoy en día implementar en tiempo real algoritmos complejos de control o procesamiento de señales (Ramos Romero, 2010).

3. Marco conceptual

3.1 Conceptos Básicos

3.1.1 Sonido. De acuerdo con Quintero (2012), “El sonido es una sensación auditiva provocada por las vibraciones y ondas acústicas de frecuencia entre 20 Hz y 20.000 Hz, que se propaga en un medio sólido, líquido o gaseoso” (p.39).

Los sonidos tienen características diferenciables tanto en el dominio del tiempo como en frecuencia. Estas corresponden a la longitud de onda, frecuencia, amplitud y fase.

Se pueden replicar diferentes tipos de sonidos, y en la naturaleza también existen sonidos que en su apreciación son muy parecidos, haciendo que algunas de las cuatro características enunciadas anteriormente sean iguales o muy similares. A partir de la medición de estas características se puede replicar sonidos totalmente iguales, haciendo posible una superposición destructiva.

3.1.2 Ruido Acústico. De acuerdo con Cabrera Ortiz (2010):

El ruido acústico es aquel ruido (entendido como sonido molesto) producido por la mezcla de ondas sonoras de distintas frecuencias y distintas amplitudes. La mezcla se produce a diferentes niveles ya que se conjugan tanto las frecuencias fundamentales como los armónicos que las acompañan (p.51).

Existen diferentes tipos de ruido acústicos:

3.1.2.1 Ruido tonal. “Este ruido corresponde a una senoide pura y habitualmente sirve como señal de prueba en la experimentación de los sistemas de control activo de ruido” (Mínguez Olivares, 1998, p.21).

3.1.2.2 Ruido periódico. “Este tipo de ruido acústico es el que se encuentra habitualmente en situaciones reales. Las fuentes de ruido son generalmente sistemas que tienen algún tipo de funcionamiento cíclico” (Mínguez Olivares, 1998, p.22).

3.1.2.3 Ruido de banda ancha. “Este tipo de ruido presenta un nivel espectral constante con respecto a la frecuencia. Cuando el ruido presenta estas características se asemeja al ruido blanco gaussiano o uniforme, y puede analizarse según estos modelos” (Mínguez Olivares, 1998, p.22).

3.1.2.4 Ruido de banda angosta. Según Budde (2013):

Los ruidos de banda angosta se caracterizan por ser determinísticos o cuasi-determinísticos del tipo periódicos. Se dice que son cuasi-determinísticos ya que en la realidad las características de los ruidos no permanecen constantes, sino que varían lentamente. Sin embargo, como esta variación se produce en un tiempo mayor a los tiempos involucrados en un sistema de control activo, se puede considerar a estos ruidos como determinísticos para su análisis en dicho sistema. Una característica fundamental de las señales determinísticas es que su comportamiento es predecible en el tiempo. Un ejemplo muy común de ruidos de banda angosta es el de los ruidos de baja frecuencia producidos por máquinas de rotación, tales como ventiladores, motores compresores o turbinas (p.15).

3.1.3 Espectro de frecuencias audibles. La clasificación estándar de las ondas acústicas en el rango audible se encuentra en la gama de frecuencias entre 20 y 20k Hz, que a su vez se dividen en sonidos graves, medios y agudos. La gama de los sonidos graves se encuentra de 20 a 300 Hz, los sonidos medios van de 300 a 2000 Hz y los agudos de 2000 a 20k Hz. ("Acústica", s.f.).

3.1.4 Propagación de ondas acústicas en ductos. Avilés Zavala (2018), refiere que si se considera un ducto recto de cierta longitud, donde sus paredes internas no posean ningún tipo de revestimiento absorbente, al ser excitado por una fuente de ruido como un altavoz, ventilador, etc., es posible predecir el comportamiento de las ondas acústicas mediante la ecuación de onda. Al considerar solamente las dimensiones Y y Z, el campo sonoro satisface la ecuación (1):

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

Al aplicar las condiciones de contorno de velocidad nula de las partículas en las paredes del ducto se tiene la ecuación (2):

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad \text{en } y = 0 \quad \text{e } y = d \quad (2)$$

Al aplicar la condición de contorno en Y=0 se tiene la ecuación (3):

$$P(y, z, t) = 2Ae^{j\omega t} e^{\lambda z} \cos(y\sqrt{k^2 + \lambda^2}) \quad (3)$$

Dónde:

- **P** es la presión de la onda en el punto (Y, Z) en un instante de tiempo.
- **A** es la amplitud de la onda.
- **λ** es un valor complejo.
- **K** es el número de onda. **K**= w/c.

Despejando el valor de λ y teniendo en cuenta la condición de pared rígida en $Y=d$, se obtiene la ecuación (4):

$$P(y, z, t) = 2A \cos \left[\left(\frac{n\pi}{d} \right) y \right] e^{\pm iz \sqrt{K^2 - \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2}} e^{i\omega t} \quad (4)$$

Donde d es el diámetro del ducto tal como se muestra en la *Figura 2*.

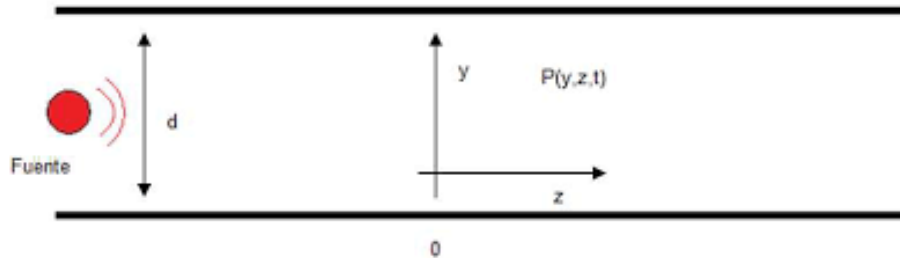


Figura 2. Propagación de la onda sonora en el ducto. Adaptado de Ramos Romero (2010).

Donde $P(y)$ tiene un modelo de propagación de ondas estacionarias a lo largo del ducto. Los valores de n solo pueden ser enteros positivos, para los que existe un modo de propagación en el eje z con cada número de onda dado por la ecuación (5):

$$K_n = \sqrt{K^2 - \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2} = \frac{1}{C} \sqrt{w^2 - \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2} \quad (5)$$

Por lo tanto, siempre que kn sea un valor real, el modo n puede propagarse a lo largo del ducto, es decir, cuando se cumpla la ecuación (6):

$$w > \frac{n\pi C}{d} \quad (6)$$

Por tanto, existe una frecuencia de corte para cada valor de n .

Es necesario generar un campo directo en el interior del ducto para evitar el campo difuso. Esto se logra para todas las frecuencias de las ondas que poseen un frente plano. Para esto es necesario determinar la frecuencia de corte del modo 0, con el que se evitarán las ondas estacionarias que dificultan la generación de frentes de onda. Una onda plana se propaga sin problemas a lo largo del ducto siempre y cuando la frecuencia este por debajo de f_1 (ver ecuación (7)):

$$f_1 = \frac{nC}{2d} \quad (7)$$

Todos estos cálculos de longitud de onda, frecuencia de corte y amplitudes de onda son indispensables al momento de definir el diámetro del ducto, pues es necesario generar frentes de onda planos para lograr interferencias destructivas de ondas acústicas dentro del ducto (Ramos Romero, 2010).

3.2 Transductores electroacústicos

3.2.1 Micrófonos. Es un circuito electrónico que realiza la transformación de ondas sonoras en energía eléctrica, mediante diferentes dispositivos electrónicos y mecánicos (Perez y Delgado, s.f.). Tienen utilidad en diferentes campos, por lo que hay variedad de ellos con diferentes especificaciones, los diferentes tipos de micrófonos no solo se dan por sus características, si no por los elementos utilizados para su construcción.

Los micrófonos se pueden clasificar de varias maneras con fines de practicidad solamente se presenta el micrófono electret, dado que es el de mayor influencia para este proyecto.

- **Micrófonos electret.** Según Quintero (2012):

Es una clase especial de micrófono condensador. Incorporan un diagrama especial, que retiene la carga estática por tiempo indefinido. Normalmente el fabricante "carga" el diafragma al

construirlo y no se requiere fuente de alimentación (como en el caso de los condensadores comunes). De todas formas, requieren un amplificador incorporado, que generalmente es transistorizado y opera con una batería (o pila) de entre 1.5 y 9 voltios, normalmente ubicada en el mismo cuerpo del micrófono (p.158).

3.2.2 Características técnicas de los transductores electroacústicos. Los parámetros acústicos y eléctricos de los micrófonos varían según el fabricante, por lo que es necesario conocer cuáles son las especificaciones técnicas generales para tener en cuenta, para la correcta elección del micrófono. Las características más relevantes son: sensibilidad, respuesta en frecuencia, directividad, impedancia de salida, ruido propio y relación señal a ruido ("Descripción equipos de audio", s.f.).

3.2.2.1 Sensibilidad. "La sensibilidad nos indica la eficiencia con que un micrófono transforma la presión sonora en tensión eléctrica, es decir, la cantidad de señal eléctrica que es capaz de proporcionar según la presión recibida" (Aranda, 2000-2001, p.3).

3.2.2.2 Respuesta en frecuencia. "Se refiere al comportamiento del micrófono ante distintas frecuencias de la señal sonora. La curva de respuesta representa la sensibilidad correspondiente a las diversas frecuencias, referidas a un nivel convencional o de referencia (0 dB para 1 Pa y mV)" (Quintero, 2012, p.162).

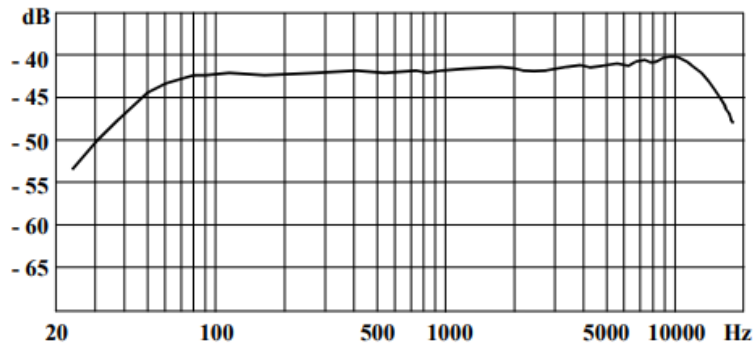


Figura 3. Respuesta en frecuencia de un micrófono. Adaptado de Miyara (2006).

3.2.2.3 Directividad. Según Aranda (2000-2001): La directividad, o la característica de respuesta directa, es la variación del nivel de salida del micrófono para cada uno de los ángulos de incidencia de la presión acústica. Se representa mediante los llamados diagramas polares de campo, los cuales consisten en una representación empleando coordenadas polares para mostrar la magnitud de una cualidad en una o en todas las direcciones, es decir 360° alrededor de un punto dado (p.4).

Dado que existen varios tipos de directividad, se presenta el cual tiene mayor relevancia en este trabajo:

- Cardioide: “Sólo recogen los sonidos precedentes de puntos situados delante del micrófono, quedando muy atenuados los procedentes de la zona posterior” (Aranda, 2000-2001, p.5).

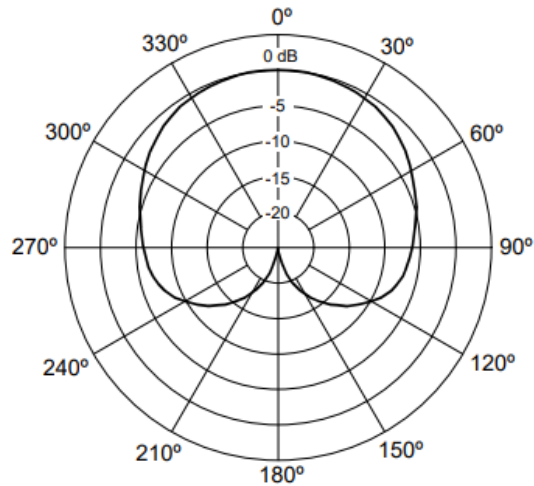


Figura 4. Diagrama polar cardioide. Adaptado de Miyara (2006).

3.2.2.4 Relación señal a ruido. Quintero (2012) afirma que “es la diferencia entre el nivel de la señal y el nivel de ruido. Se entiende como ruido cualquier señal no deseada, en este caso, la señal eléctrica no deseada que circula por el interior de un equipo electrónico” (p.49).

3.2.3 Altavoces. El altavoz es un transductor electro-acústico que se encarga de recibir las señales eléctricas y transformarlas en ondas sonoras, este está constituido por un imán permanente que crea un campo magnético, en el cual se encuentra situada una bobina por la cual se hace circular una corriente eléctrica generando así otro campo magnético que tiene una polaridad, de acuerdo a la polaridad puede haber rechazo o acercamiento del campo magnético donde está situada la bobina, haciendo mover una estructura llamada diafragma, la cual puede tener forma de cono o de cúpula, que es la que se encarga de transmitir el sonido al aire (Peña y Cuando, 2009).

El altavoz se puede clasificar según diferentes criterios, por ejemplo, en función al rango en la banda de frecuencias en que trabajan, la forma de radiar y en función del transductor

electromagnético usado (Peña y Cuando, 2009). Sin embargo, según al rango de frecuencias que opera, se clasifican:

- **Woofers:** “Son los altavoces de mayor tamaño y reproducen las frecuencias más bajas del espectro, que cubre de los 20 a 500 Hz aproximadamente, con un diámetro de entre 15 y 45 cm” (Peña y Cuando, 2009, p.9).
- **Midrange:** “Los altavoces de medios tienen diámetros entre 10 y 15 cm y se utilizan para reproducir bandas comprendidas entre los 500 a 3000 Hz” (Peña y Cuando, 2009, p.10).
- **Tweeters:** “Los altavoces de alta frecuencia estos pueden llegar a superar los 20 kHz y poseen diámetros entre los 2.5 y 10 cm” (Peña y Cuando, 2009, p.11).

3.2.4 Características técnicas de los altavoces.

3.2.4.1 Potencia. Según Quintero (2012):

La potencia se puede clasificar en mínima y máxima. La primera viene determinada por la sensibilidad que posee la membrana para reproducir el sonido, en cuanto a la máxima se pueden hacer dos diferenciaciones dependiendo de la potencia que puede soportar un altavoz, la potencia nominal y la potencia musical. La *potencia nominal o RMS* es aquella que puede soportar el altavoz de modo continuo sin que se produzca un calentamiento excesivo en el propio altavoz ni distorsiones en el sonido. Dicha potencia viene determinada en vatios (W). El volumen de sonido máximo, y por tanto el espacio útil que puede cubrir con normalidad el altavoz depende de esta característica y va ligada directamente al tamaño de su cono. En las características se indica esta potencia para una frecuencia normalizada de 1 KHz. En cuanto a la distorsión se considera como

valor normalizado el 2,5 o el 3%. La *potencia musical o de pico* es la máxima que puede soportar el altavoz en un momento dado sin destruirse, es decir, durante un breve periodo de tiempo (p.100).

3.2.4.2 Distorsión. “Es la diferencia que existe entre la señal aplicada al altavoz y la que éste reproduce” (Quintero, 2012, p.101).

3.3 Control activo de ruido

Un sistema de control activo de ruido permite la cancelación o reducción de la amplitud de una señal específica (señales que se consideren como ruido en un lugar determinado) generando la misma señal en contrafase. En este tipo de control existen dos formas de implementación, los sistemas feedforward y los sistemas feedback.

El feedback o realimentación (**Figura 5**) es un sistema de control que se basa en adquirir la señal de salida del sistema y redirigirla hacia la entrada con el fin de realizar una comparación, obteniendo una señal de error, que permitirá la decisión de control.

El feedforward o prealimentación (**Figura 6**) es un sistema de control que se basa en sensor la señal de ruido y enviarla al controlador, dadas estas dos señales toma la acción de control requerida, evitando alteraciones o perturbaciones no deseadas.

Generalmente el control activo consta de 3 partes fundamentales (**Figura 7**): Sensor de ruido ubicado en la zona donde se quiere eliminar, este sensor puede ser un micrófono de especificaciones adecuadas según las características de la señal a eliminar, gran parte de la efectividad de este método requiere que la sensibilidad del sensor sea buena, la segunda parte es el procesamiento y generación de la señal que realizará la superposición o destrucción de ondas,

esta señal debe generarse en contrafase a la señal de entrada. La última parte es el emisor que suele ser un parlante situado a una distancia determinada dependiendo del principio que se quiera utilizar (principio de superposición o principio de destrucción) (Tekavčič, 2010-2011).

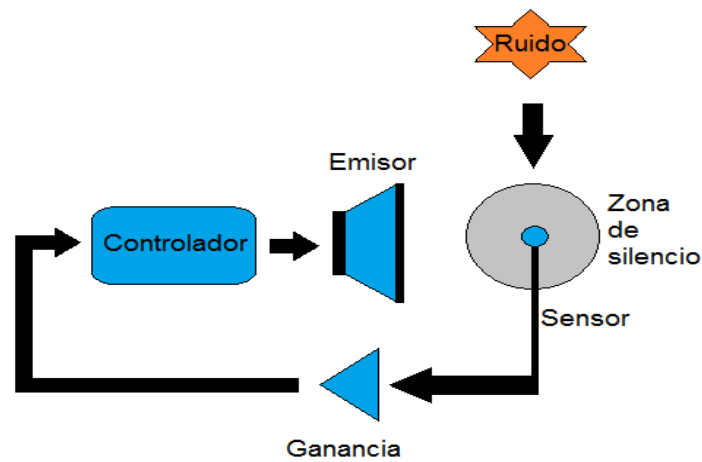


Figura 5. Sistema de control feedback.

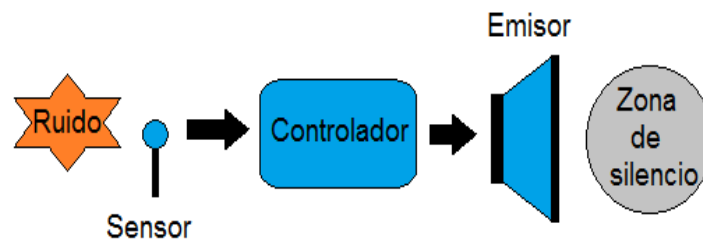


Figura 6. Sistema de control feedforward.

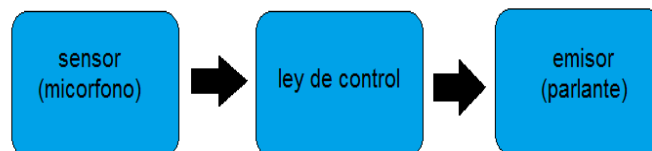


Figura 7. Sistema de control general.

4. Caracterización del espacio físico de ruido acústico

4.1 Espacio de trabajo

El espacio de trabajo de este proyecto es la sala de supercomputación de la Universidad Industrial de Santander (UIS) ubicada en la sede de investigación Guatiguará. Esta sala cuenta con un equipo de cómputo avanzado (*Figura 8*) cuyas dimensiones son 8.05 metros de largo, 3.44 metros de ancho tal como se muestra en la *Figura 9*.

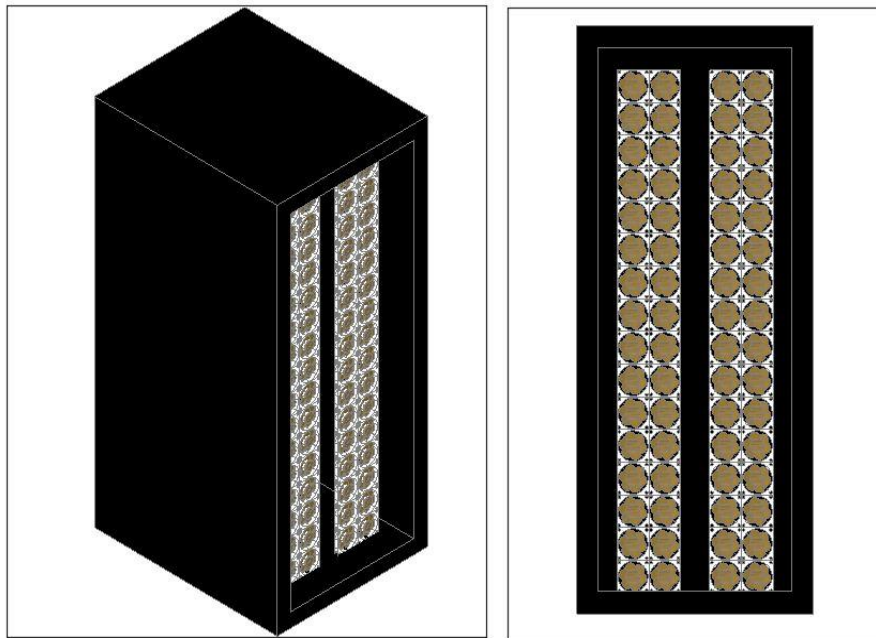


Figura 8. Estructura básica del supercomputador (Fuente de ruido).

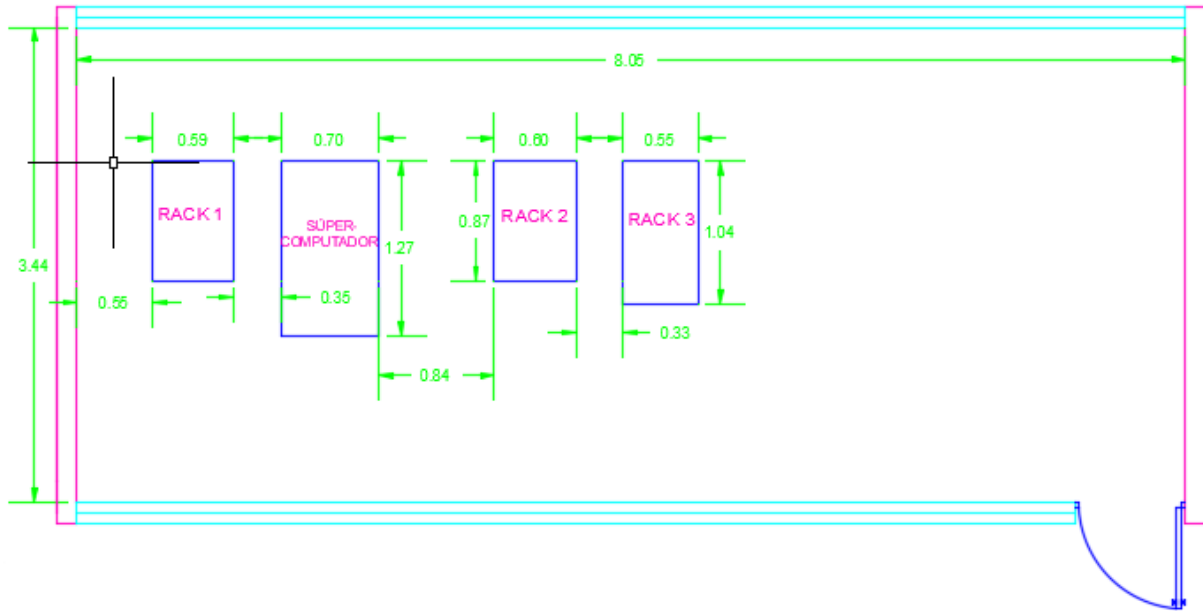


Figura 9. Plano de vista superior del área de trabajo.

Actualmente esta sala de supercómputo cuenta con 4 racks (*Risk Aware Consensual Kink*) en donde 3 de ellos están destinados para almacenamiento de datos y 1 para procesamiento de información. Teniendo en cuenta que el rack de procesamiento de información es el que tiene los ventiladores de extracción de calor, este proyecto se basa específicamente en esa fuente de ruido.

El equipo de cómputo cuenta con 16 nodos ProLiant SL390s G7 de los cuales 11 nodos cuentan con 2 procesadores Intel® Xeon® CPU E5645 @ 2.40GHz. (12 cores 2 Hebra) y 5 nodos cuentan con dos procesadores Intel® Xeon® CPU E5640 @ 2.67GHz. (8 cores 2 Hebra), todos los nodos cuentan con 104 GB de memoria RAM, 1 disco SAS de 200GB y una unidad de 8 GPU Tesla S2050. El equipo requiere un determinado rango de temperatura para su normal funcionamiento y cuenta con un sistema de extracción de calor consistente de múltiples ventiladores, que, dependiendo de la frecuencia de operación, aumentan las revoluciones para optimizar la extracción en determinado instante.

Estos extractores se convierten en una gran fuente de ruido, principalmente cuando aumenta la frecuencia en las revoluciones de sus ventiladores, que provoca un fuerte aumento en los decibeles de ruido. Tal situación dificulta trabajar confortablemente cerca a esta zona, debido a que el nivel de ruido está por encima del nivel máximo permitido por la OMS para trabajo seguro.

Además del sistema de extracción de calor, la sala cuenta con un sistema de refrigeración (aire acondicionado), que garantiza una temperatura mínima dentro de la sala para la normal operación del computador, por tanto, las turbinas del aire acondicionado aportan un ruido no deseado al interior de esta sala.

En el diseño de obra civil de esta sala de supercomputación se tuvo en cuenta estas dos fuentes de ruido indeseado, por lo que se aisló el supercomputador en una sala con las condiciones idóneas para aislarlas de forma pasiva. El sistema de cancelación pasivo de ruido es efectivo para altas frecuencias, pero el ruido generado por el sistema de extracción de calor no se logra cancelar con este aislamiento, debido a que se genera a bajas frecuencias.

Por tanto, al no haber cancelación pasiva completa y tener aún altos niveles de ruido en el exterior de la sala, se hace necesario implementar otros tipos de cancelación para bajas frecuencias como lo es la cancelación activa de ruido acústico, concepto que explora este proyecto para su implementación en este espacio de trabajo.

4.2 Medición del nivel de ruido

Para poder caracterizar el tipo de ruido acústico de la sala se realizaron mediciones con el sonómetro EXTECH modelo 407750, en diferentes momentos y diferentes porcentajes de

operación del supercomputador que son el 30%, 60% y 90%. Se tuvo como referencia un intervalo Inter muestral de 10 minutos. Tales mediciones se presentan en la *Figura 11*.



Figura 10. Sonómetro.

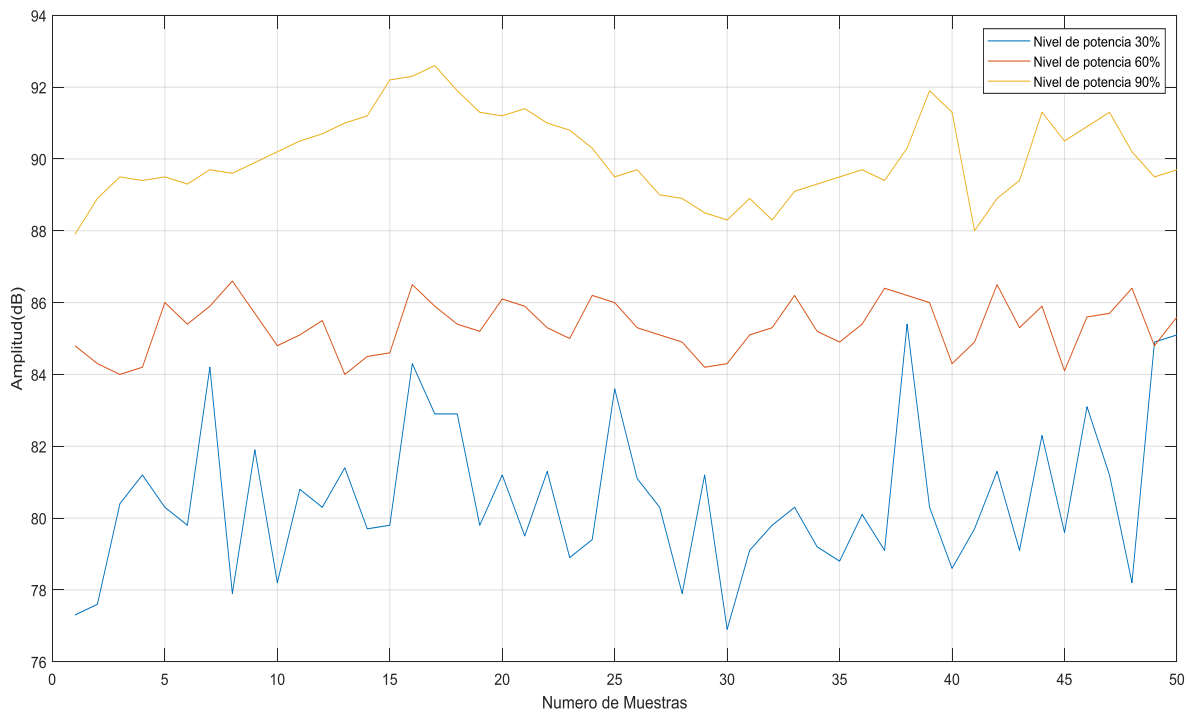


Figura 11. Potencia del ruido a diferentes capacidades de operación.

A partir de estos resultados, se utilizó la ecuación (8) para determinar el nivel sonoro (NS_A) (Echeverri Londoño y Gonzáles Fernandez, 2011)

$$NS_A = 10LOG \left[\frac{\sum T_i x 10^{\left(\frac{K}{10}\right)}}{\sum T_i} \right] \quad (8)$$

Donde:

NS_A es el Nivel de presión sonora continua equivalente, medido en un intervalo de 8 horas y 20 minutos con respuesta temporal rápida, medida en dB.

K el nivel de presión sonora continua equivalente representativo de cada muestra.

T_i el intervalo de tiempo de medición de cada muestra individual.

Si las mediciones de cada muestra tienen la misma duración, la ecuación (8) se puede simplificar en la ecuación (9):

$$NS_A = 10LOG \left[\frac{\sum 10^{\left(\frac{K}{10}\right)}}{N} \right] \quad (9)$$

Donde:

N es el número total de mediciones

Por tanto, para las 50 mediciones realizadas en cada porcentaje de operación del supercomputador el nivel sonoro obtenido en el punto de atenuación es de 82.36 (dB) para el 30%, 84.45 (dB) para el 60% y de 90.35 (dB) para el 90%.

4.3 Modelo dinámico

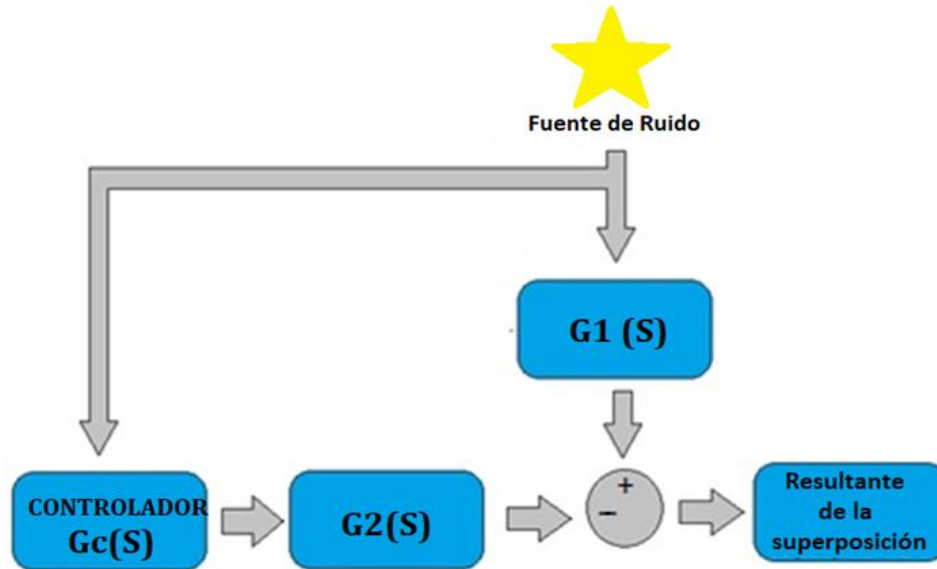


Figura 12. Diagrama de bloques del sistema de control

El diagrama de bloques (ver *Figura 12*) muestra el sistema de control propuesto para la atenuación del ruido producido por el supercomputador. Por lo que se hallaron las funciones de transferencias correspondientes al ruido del supercomputador $G_1(s)$ (ver ecuación (10)), sistema de atenuación $G_2(s)$ (ver ecuación (11)), y controlador (ver ecuación (12)).

$$G_1(s) = \frac{0.7081}{0.0156s + 1} e^{-0.0082s} \quad (10)$$

$$G_2(s) = \frac{0.8109}{0.0000712s + 1} e^{-0.00214s} \quad (11)$$

$$\text{Controlador} = \frac{-R2}{R1} = \frac{-99.3}{99.7} = -0.9959 \quad (12)$$

5. Modelo de atenuación de ruido propuesto

El método de cancelación activa de ruido acústico propone enfrentar en contrafase dos ondas acústicas que viajan por el medio con una determinada amplitud, realizando superposición de ondas destructiva.

De acuerdo con Lueg (1936), quién demostró la teoría ANC utilizando condiciones ideales, sin tener en cuenta factores externos en el medio se obtendría una cancelación total. Dado que las condiciones del entorno se ven afectadas por diversas perturbaciones, los resultados mostrados en la literatura no presentan cancelación total sino atenuaciones que varían según el ruido y la forma de su implementación.

Partiendo de un principio muy importante de control, como es la Pre-realimentación o sistema *feedforward*, es posible diseñar un sistema de control que permita sensar la señal de ruido acústico y al mismo tiempo disminuir su amplitud al generar la señal en contrafase. El sistema básico consta de un sensor (micrófono para captar la señal de ruido), controlador (decisión de control) y emisor (sistema de amplificación).

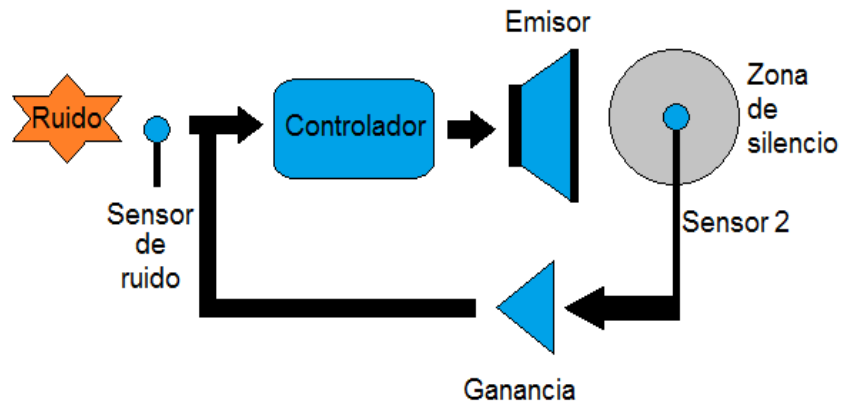


Figura 13. Sistema de control *feedforward*.

El primer paso para implementar el sistema es ubicar el micrófono cerca a la fuente de ruido. La señal sensada pasa a la etapa de inversión que entrega una segunda señal desfasada respecto a la original y la que es finalmente reproducida por un parlante. De esta forma se obtiene una señal atenuadora con la que se genera el enfrentamiento con la onda de ruido, en la zona de silencio.

En este proyecto fue necesario diseñar diversas configuraciones, con el fin de analizar algunos modelos de atenuación activa de ruido, y la influencia que tienen los parámetros de diseño en la zona de silencio. Dado que cada parámetro influye de forma diferente, se diseñaron algunas configuraciones para observar la influencia individual de cada parámetro. Finalmente, para la implementación de un controlador, se integraron las mejores configuraciones obtenidas en este proyecto, junto con algunas reportadas en la literatura

6. Diseño de experimentos

Para el desarrollo de las configuraciones propuestas se implementó un sistema de atenuación activa de ruido, en las que se utilizó la misma ganancia, tanto en la señal de ruido como en la generada para realizar la atenuación. Los siguientes equipos y elementos fueron utilizados:

- Generador de señales BK PRECISION 4040A.
- Fuente regulada de voltaje BK PRECISION 1672.
- Osciloscopio GwINSTEK GDS-2062.
- Circuito inversor de fase.
- Micrófono electret MO093803-2 (ver **Apéndice C.**).
- Circuito amplificador de audio.
- Parlantes Unitec U-p-420 para Pc.
- PicoScope 3204A.
- Sonómetro EXTECH 407750.
- Secador de cabello Alízz PROFESSIONAL.
- Tubo PVC 3”.

Mientras que las siguientes señales básicas fueron medidas en cada prueba:

- **Ruido ambiental:** Ruido generado solo por el medio ambiente.
- **Ruido total:** Ruido generado por la fuente, más ruido ambiente.
- **Ruido remanente:** Ruido resultante después de la superposición de las dos ondas (señal de ruido más la señal generada en contrafase).

6.1 Prueba 1

Abordando la teoría de cancelación activa de ruido, se diseñó una prueba sencilla por medio de parlantes y un sistema de procesamiento digital (Matlab), la que se presenta en la *Figura 14*.

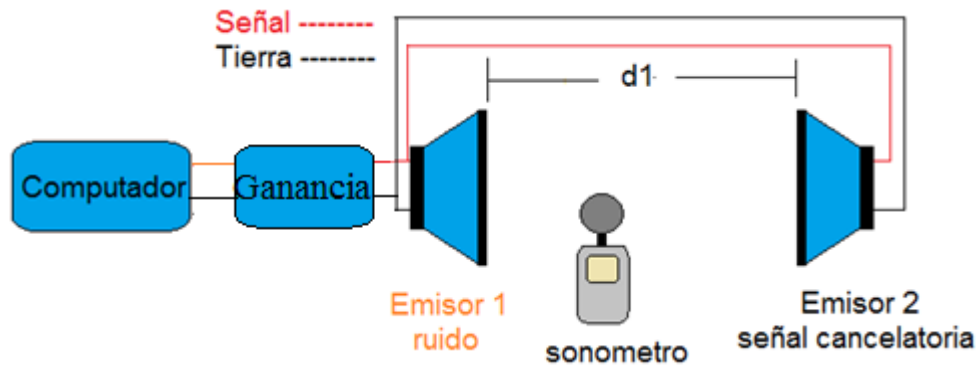


Figura 14. Configuración 1.

La prueba consiste en realizar un algoritmo que genere dos tonos idénticos de 1 kHz en contrafase. Una vez generadas las dos señales se usó la salida estéreo del computador, para enviar las señales separadas a cada parlante al mismo tiempo. Finalmente se ubicaron los dos parlantes en direcciones opuestas y se varió la distancia de uno de ellos con respecto a un punto de referencia, con el fin de obtener la mejor atenuación de ruido.

6.2 Prueba 2

Con el fin de estudiar la distancia óptima para atenuar señales de ruido periódicas y no periódicas propagándose libremente, se diseñó la configuración mostrada en la *Figura 15*.

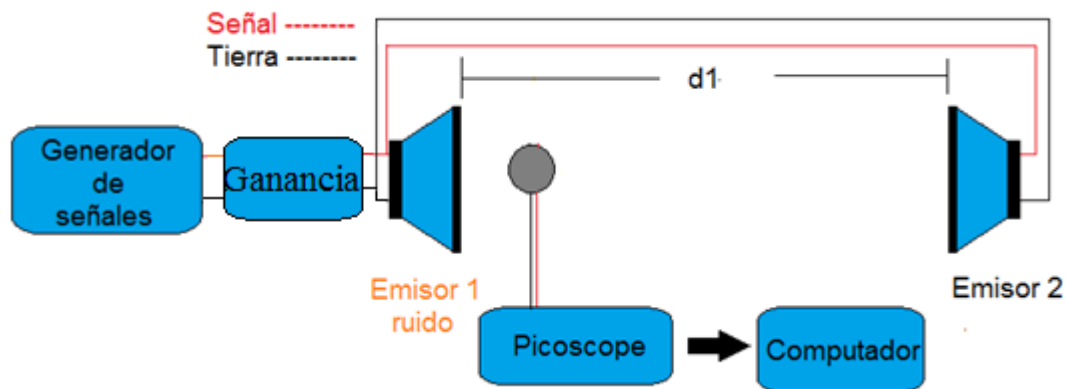


Figura 15. Configuración 2.

Como primera instancia se generó una señal de 1 kHz que se reprodujo por dos parlantes enfrentados, intentado realizar superposición destructiva al variar la distancia $d1$ (ver **Figura 15**). Finalmente, se cambió la señal por una grabación de ruido generado por el supercomputador y se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente.

6.3 Prueba 3

Esta prueba se realizó con el objetivo de determinar la implicación de utilizar como ley de control la inversión de la señal de ruido generada a una determinada distancia.

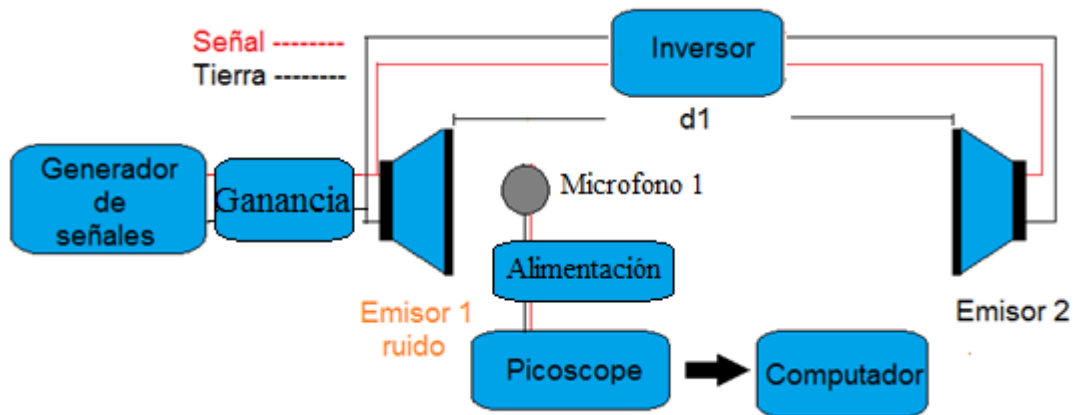


Figura 16. Configuración 3.

La prueba inicia con la generación de un tono sintonizado a una frecuencia de 1kHz y reproducido por el parlante *emisor 1*, simulando la fuente de ruido. Utilizando un micrófono, ubicado en la zona de atenuación, se transmitió la señal de ruido a la etapa de inversión de fase y esta se reprodujo en el parlante *emisor 2*. Esto con el fin de enfrentar las dos señales, intentando realizar destrucción de ondas.

6.4 Prueba 4

Esta prueba (ver *Figura 17*) se realizó con el objetivo de determinar la implicación de utilizar como ley de control el filtrado e inversión de la señal de ruido generada a una determinada distancia.

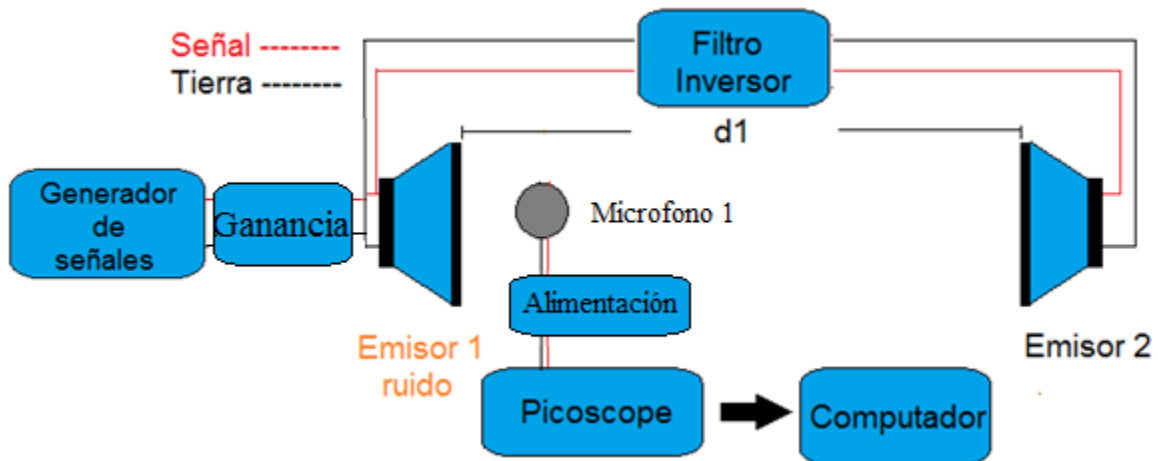


Figura 17. Configuración 4.

En un principio se genera una señal de 1 kHz, enviada al parlante *emisor 1*. Utilizando el *micrófono 1* ubicado en la zona de atenuación se transmitió la señal de ruido a la etapa de filtrado e inversión que es reproducida por el parlante *emisor 2*, y enfrentada con la señal original. Esto con el fin de enfrentar las dos señales, intentando realizar destrucción de ondas. Finalmente, se cambió la señal por una grabación de ruido generado por el supercomputador y se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente.

6.5 Prueba 5

Con el propósito de analizar el efecto que tiene el medio de transmisión para atenuar señales periódicas y no periódicas propagadas por el ducto, se diseñó la configuración mostrada en la *Figura 18*.

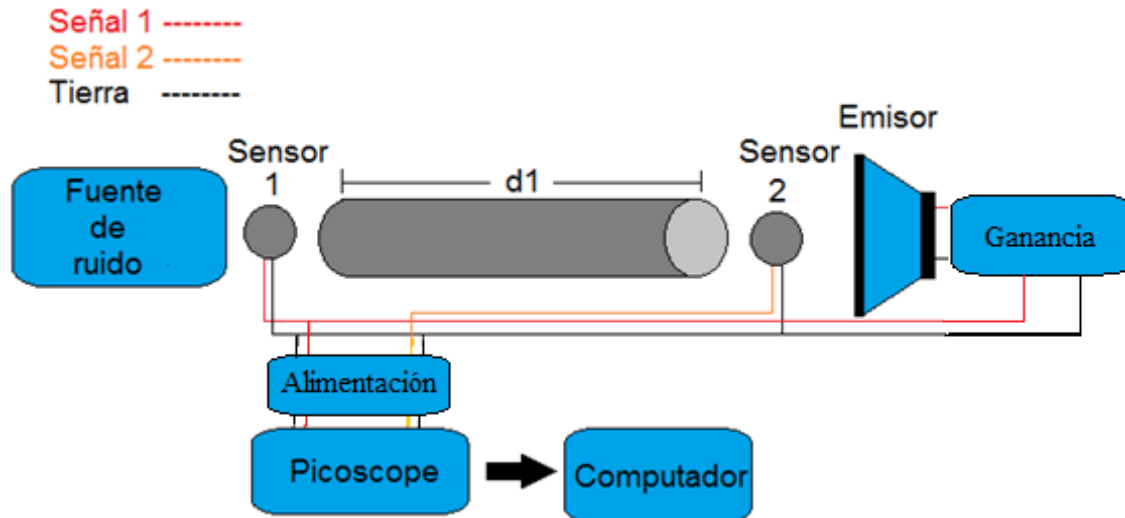


Figura 18. Configuración 5.

Con el fin de simular el ruido original a cancelar, se utilizó un secador como fuente de ruido ubicado en un extremo de la tubería. Utilizando un micrófono *sensor 1* se transmitió la señal de ruido a un parlante *emisor*, el cual se ubicó en el extremo contrario de la tubería intentado realizar superposición destructiva.

Con el objetivo de calcular la frecuencia máxima de atenuación se realizan los cálculos a partir de la ecuación (7), obteniendo una frecuencia de corte de 2.251 kHz.

6.6 Prueba 6

Debido a los resultados obtenidos con las configuraciones anteriores se diseñó la *Configuración 6* (ver *Figura 19*), cuyo objetivo es analizar la implicación que tiene utilizar un circuito inversor de fase.

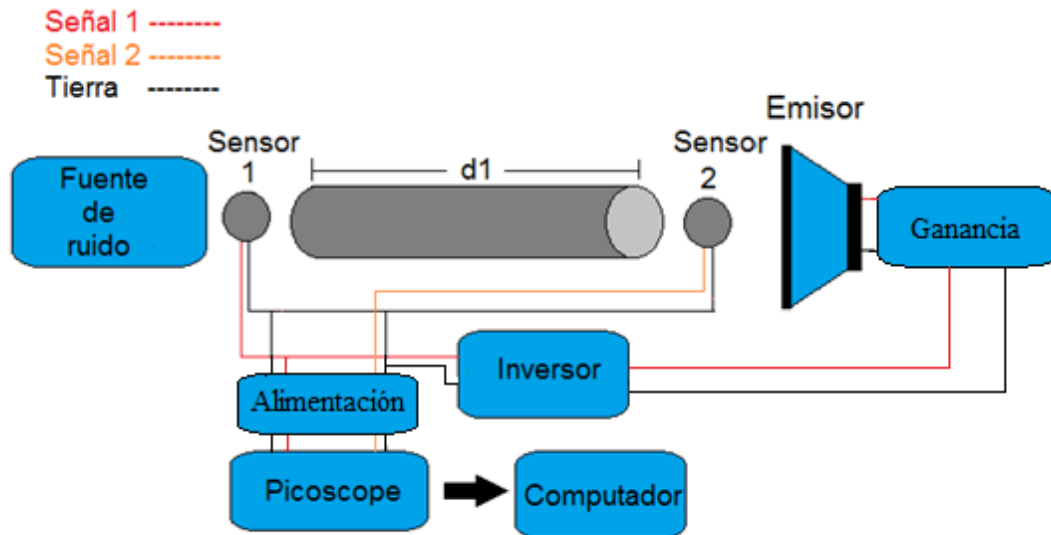


Figura 19. Configuración 6

Con el fin de simular el ruido original a cancelar, se utilizó un secador como fuente de ruido ubicado en un extremo de la tubería. Utilizando un micrófono *sensor 1* se transmitió la señal de ruido a la etapa de inversión y esta se reprodujo en el parlante *emisor*, el cual se ubicó en el extremo contrario de la tubería intentado realizar superposición destructiva al variar la distancia $d1$ (ver *Figura 19*).

6.7 Prueba 7

Con el fin de estudiar la incidencia del ángulo para atenuar señales de ruido, se diseñó la configuración presentada en la *Figura 20*.

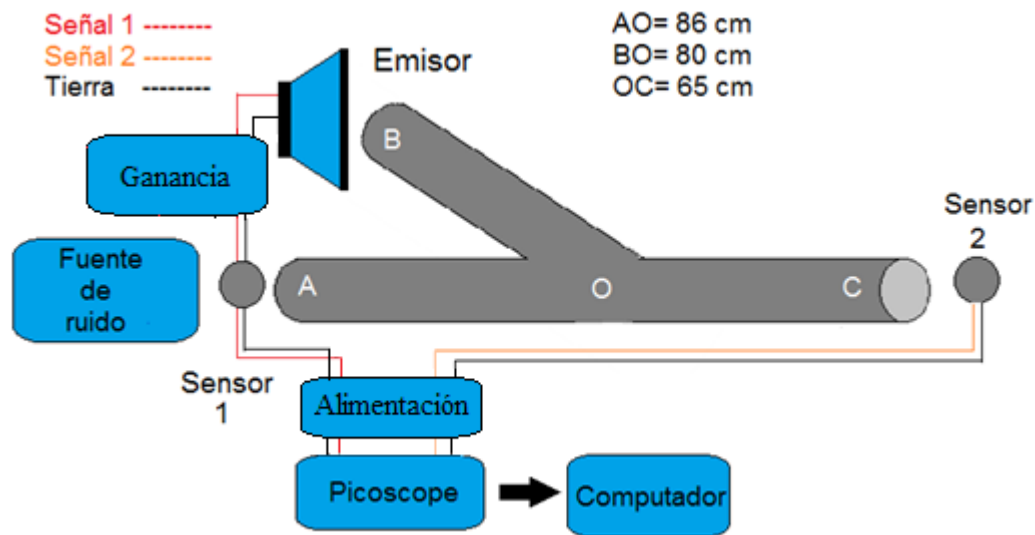


Figura 20. Configuración 7.

Se procedió a utilizar un secador ubicado en el punto *A* como fuente de ruido, utilizando el *sensor 1* se transmitió la señal de ruido al parlante *emisor* ubicado en el punto *B*. En el extremo *C* se encuentra ubicado el micrófono *sensor 2* que se encarga del sensado del ruido remanente. Se realizó la variación de la distancia \overline{BO} para encontrar el punto óptimo de atenuación.

6.8 Prueba 8

Con el fin de estudiar la incidencia del ángulo e inversión de fase para atenuar señales de ruido, se diseñó la configuración presentada en la *Figura 21*.

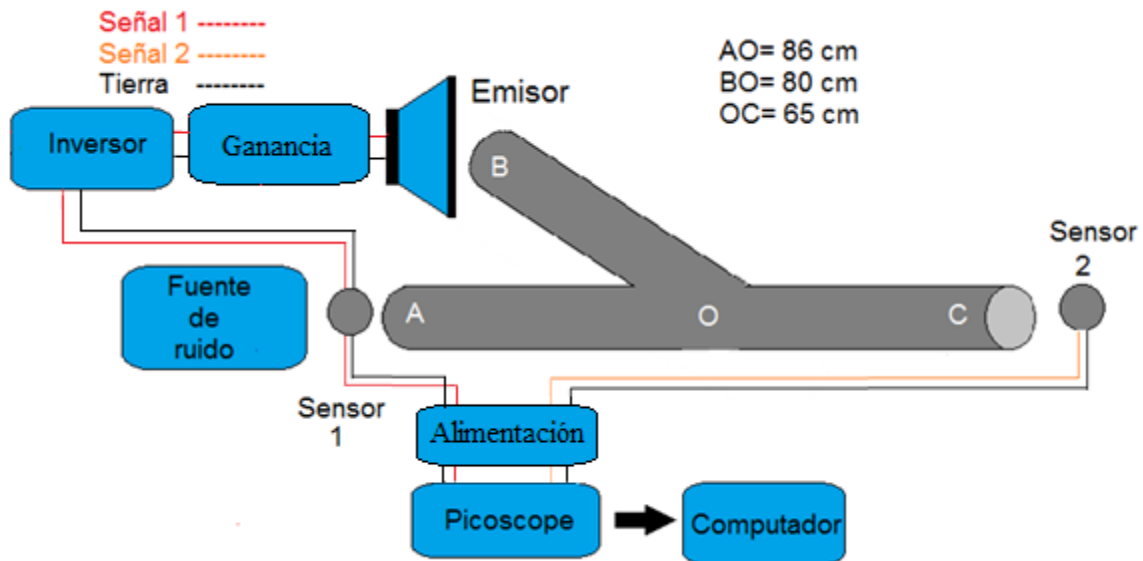


Figura 21. Configuración 8.

Se utilizó un secador ubicado en el punto *A* como fuente de ruido, utilizando el *sensor 1* se transmitió la señal de ruido a la etapa de inversión y se reprodujo en el parlante *emisor* ubicado en el punto *B*. Se busca generar atenuación desde el punto *O* en adelante, lo cual se validará con el micrófono *sensor 2* ubicado en el punto *C* para esto se varió la distancia \overline{BO} .

6.9 Prueba 9

Se diseñó la *Configuración 9*, con el objetivo de implementar un método de extracción de calor que no afecte la función principal del sistema de refrigeración del supercomputador, por lo que se ubicó una salida de aire en el ducto.

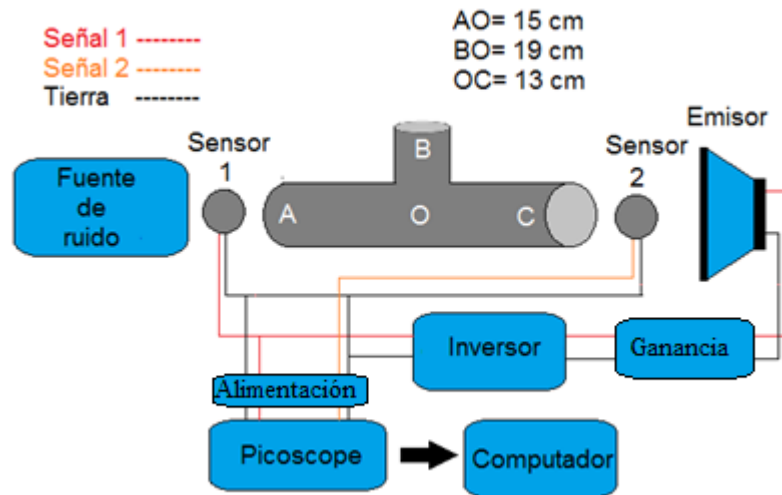


Figura 22. Configuración 9

En primera instancia se generó el ruido con el secador en el extremo A del tubo. A diferencia de la *Configuración 6* se mantienen constantes las distancias de los tubos laterales y se varía la ubicación de la salida de aire. Utilizando un micrófono *sensor 1* ubicado en el punto A se transmitió la señal de ruido a la etapa de inversión de fase y se reprodujo por el parlante *emisor* ubicado en el punto C. En la validación de la señal remanente se utilizó el micrófono *sensor 2* ubicado en el punto C. Finalmente para obtener los resultados se incrementó la ganancia de la señal generada para realizar la cancelación hasta observar atenuación en la zona de silencio.

6.10 Prueba 10

Teniendo en cuenta la fuente de ruido principal, como lo es el sistema de extracción del supercomputador, se realiza la validación del sistema obtenido en la estructura diseñada para esto. La *configuración 10* presenta el sistema completo de atenuación de ruido para una pieza del sistema modular.

Teniendo en cuenta la *configuración 9*, se realizó el mismo procedimiento para obtener la máxima atenuación en la zona de silencio.

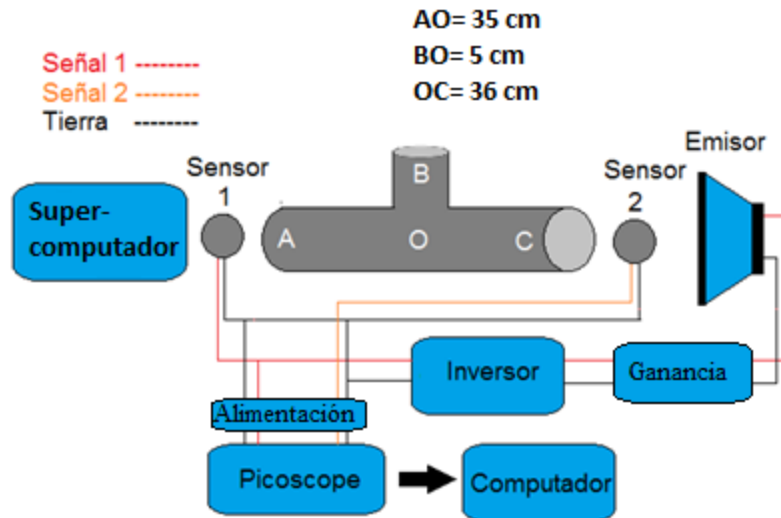


Figura 23. Configuración 10

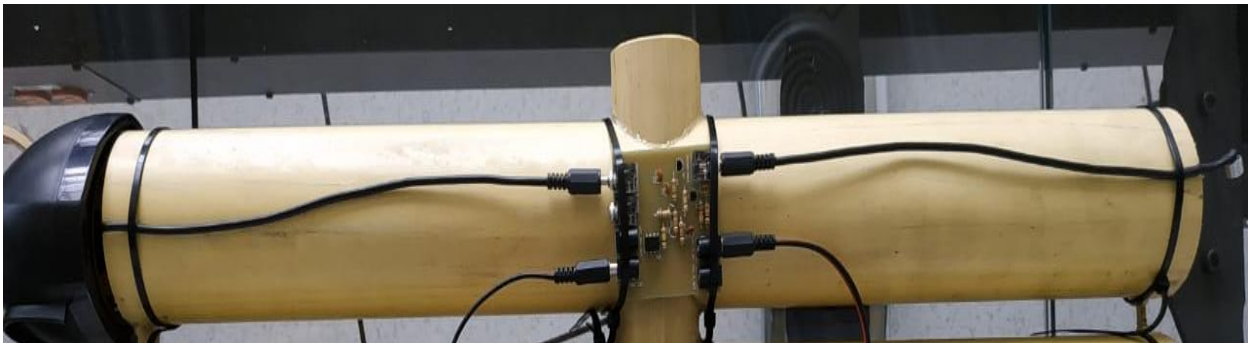


Figura 24. Imagen real configuración 10.

6.11 Prueba 11

Esta prueba se diseñó con 3 módulos con el fin de obtener una mayor atenuación y comprobar la funcionalidad del sistema de control. Como muestra la *configuración 11* se tiene el *sensor 1*,

sensor 2 y *sensor 3* ubicados en punto *A* del ducto correspondiente, se transmiten las señales al controlador (ver **Apéndice A.** y **Apéndice B.**) y se reproducen las señales por los parlantes: *emisor 1*, *emisor 2* y *emisor 3* ubicados en el punto *C* de cada ducto. El *sensor 4*, *sensor 5* y *sensor 6* son utilizados para la validación de la señal remanente. Finalmente se ajusta la ganancia hasta obtener atenuación en la zona de cancelación.

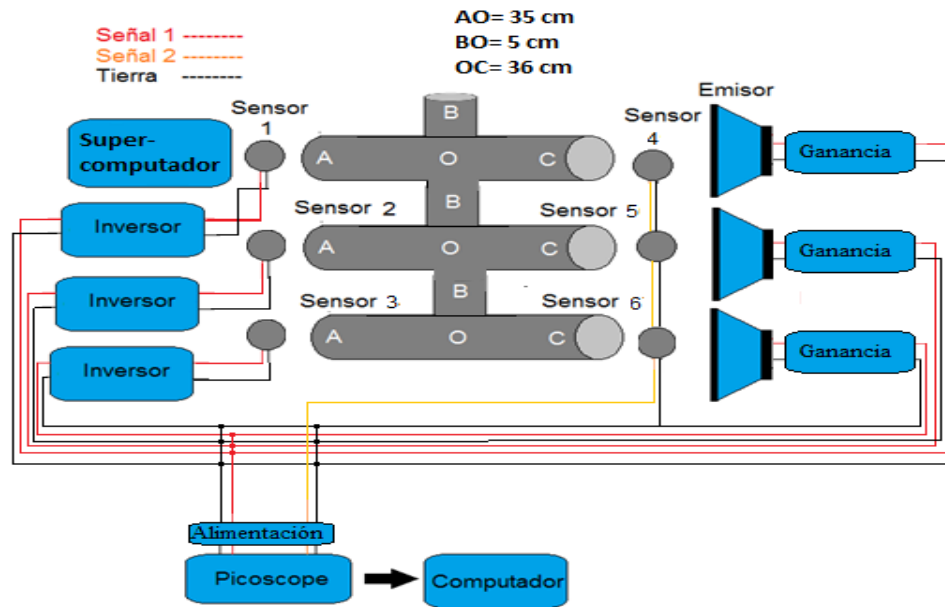


Figura 25. Configuración 11



Figura 26. Imagen real configuración 11.

7. Resultados experimentales

7.1 Prueba 1

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en Matlab a partir de la prueba 1.

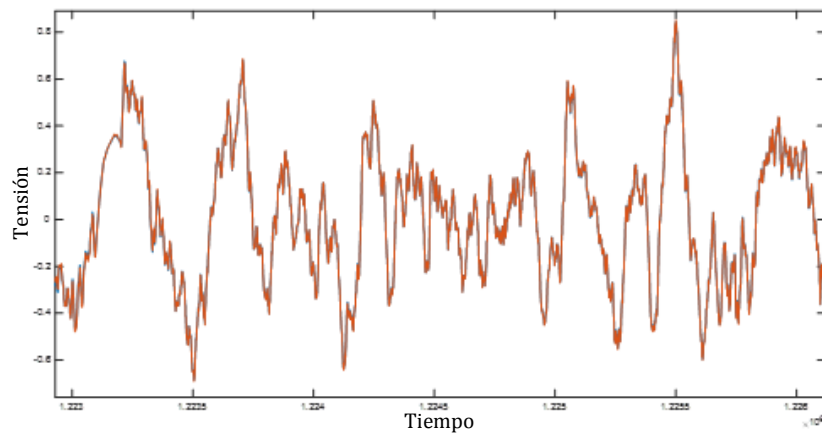


Figura 27. Respuesta en frecuencia de ruido de la grabación del supercomputador analizada en Matlab.

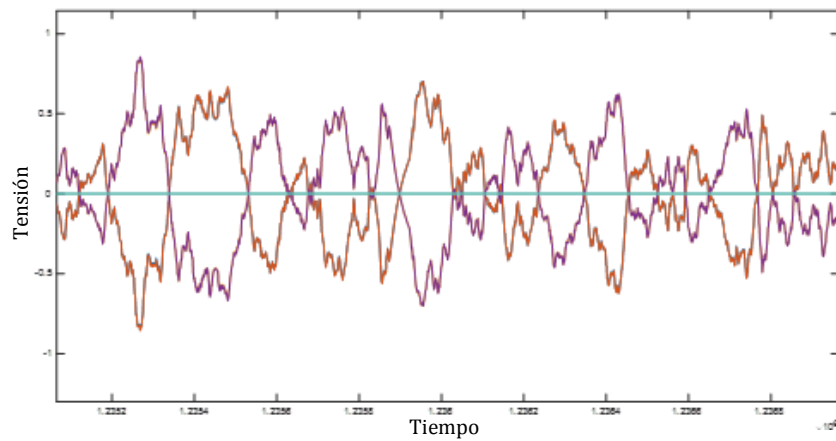


Figura 28. Respuesta en frecuencia de las señales original y desfasada 180 grados.

Dado los resultados anteriores se realiza la toma de datos de los montajes en físico, los cuales son presentados en las tablas de ruido ambiente, ruido total y señal resultante.

Tabla 1

Ruido ambiente

NÚMERO DE MEDICIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POTENCIA EN dB	56.7	59.4	55.1	57.3	56.4	58.8	56.1	55.8	59.3	57.9

Tabla 2

Ruido total

NÚMERO DE MEDICIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POTENCIA EN dB	89.5	88.7	90.3	87.9	89.2	89.5	90.1	88.3	88.9	89.1

Tabla 3

Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 9 cm

NÚMERO DE MEDICIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POTENCIA EN dB	78.9	78.4	79.4	78.8	78.3	79.2	79.0	79.3	78.1	77.8

Tabla 4

Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 0 cm

NÚMERO DE MEDICIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POTENCIA EN dB	65.7	66.3	65.2	65.8	66.4	66.2	66.9	66.0	65.7	65.9

7.2 Prueba 2

Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron al realizar la prueba 2.

Tabla 5

Ruido total

NÚMERO DE MEDICIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POTENCIA EN dB	104.7	103.9	104.5	104.8	104.3	104.1	103.7	104.2	104.9	104.5

Tabla 6

Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 30cm

NÚMERO DE MEDICIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POTENCIA EN dB	98.7	99.0	98.6	98.9	98.8	98.7	98.5	99.1	99.3	98.4

Tabla 7

Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 0 cm

NÚMERO DE MEDICIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POTENCIA EN dB	109.4	109.1	109.5	109.8	109.4	108.4	109.3	109.7	110.7	110.4

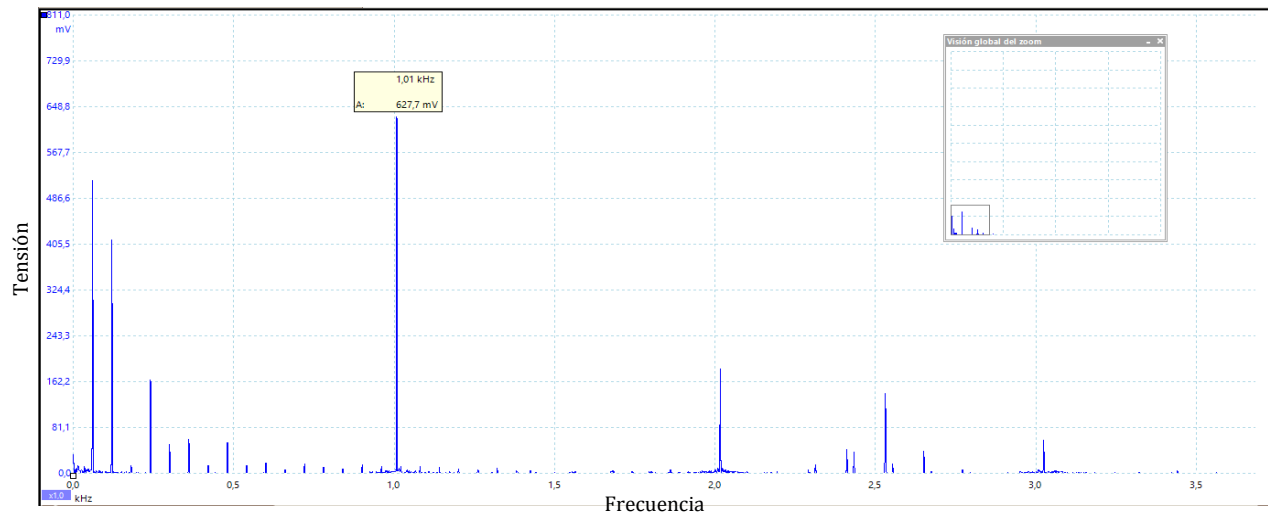


Figura 29. Respuesta en frecuencia del ruido total (tono de 1 kHz de frecuencia).

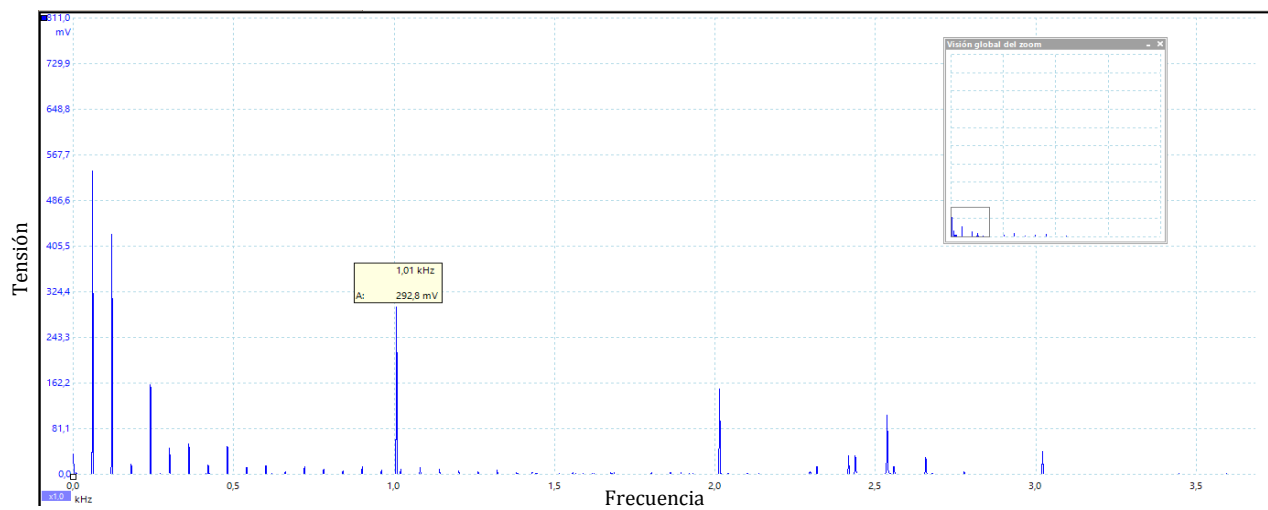


Figura 30. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas en la zona de cancelación a una distancia $d_1 = 30$ cm.

7.3 Prueba 3

Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron al realizar la prueba 3.

Tabla 8

Ruido total

NÚMERO DE MEDICIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POTENCIA EN dB	107.2	107.5	107.9	108.4	108.1	106.9	106.3	107.1	107.7	108.2

Tabla 9

Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 5cm

NÚMERO DE MEDICIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POTENCIA EN dB	99.8	98.9	99.2	99.5	100.1	101.2	99.7	98.9	99.3	99.5

Tabla 10

Señal resultante de la superposición de ondas a una distancia de 0cm

NÚMERO DE MEDICIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POTENCIA EN dB	78.9	78.5	79.1	79.4	78.2	79.4	80.1	79.7	79.2	78.8

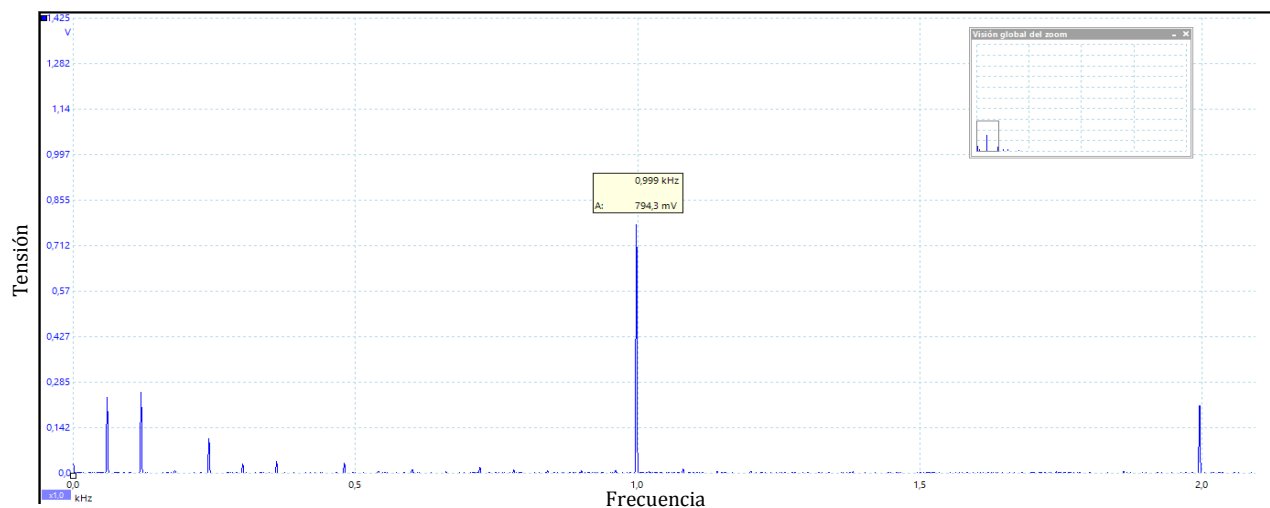


Figura 31. Respuesta en frecuencia del ruido total (tono de 1 kHz de frecuencia).

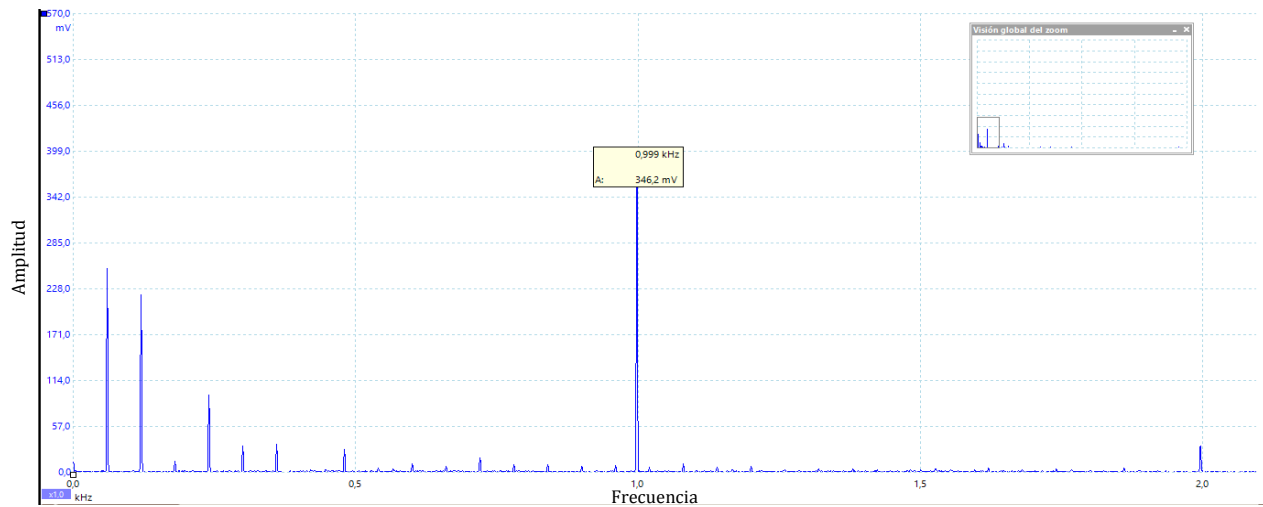


Figura 32. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas en la zona de cancelación, con una distancia $d_1 = 5\text{ cm}$.

7.4 Prueba 4

Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron al realizar la prueba 4.

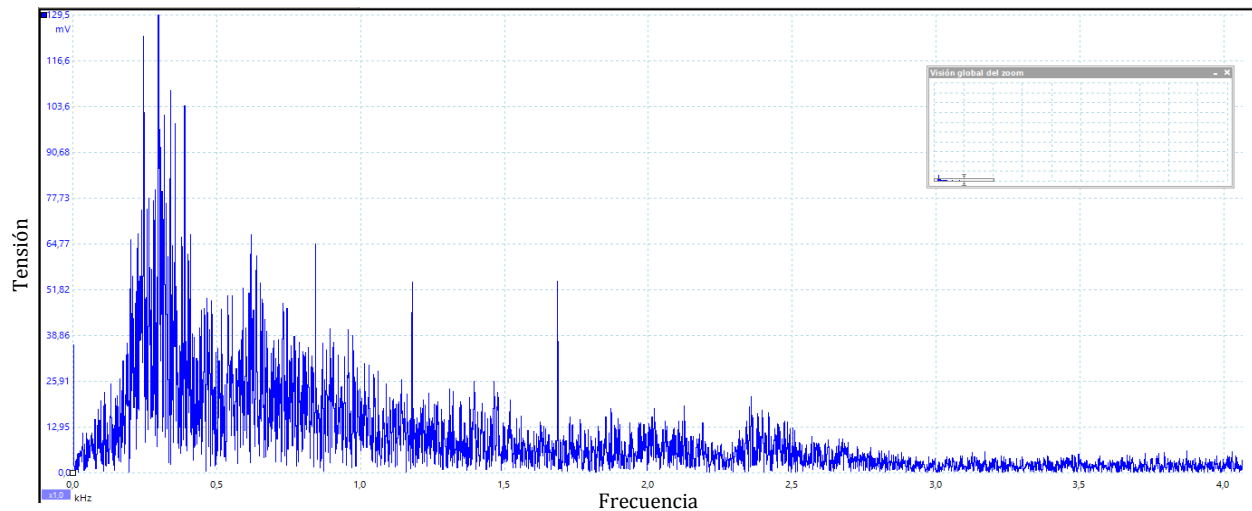


Figura 33. Respuesta en frecuencia del ruido de la grabación obtenida del supercomputador.

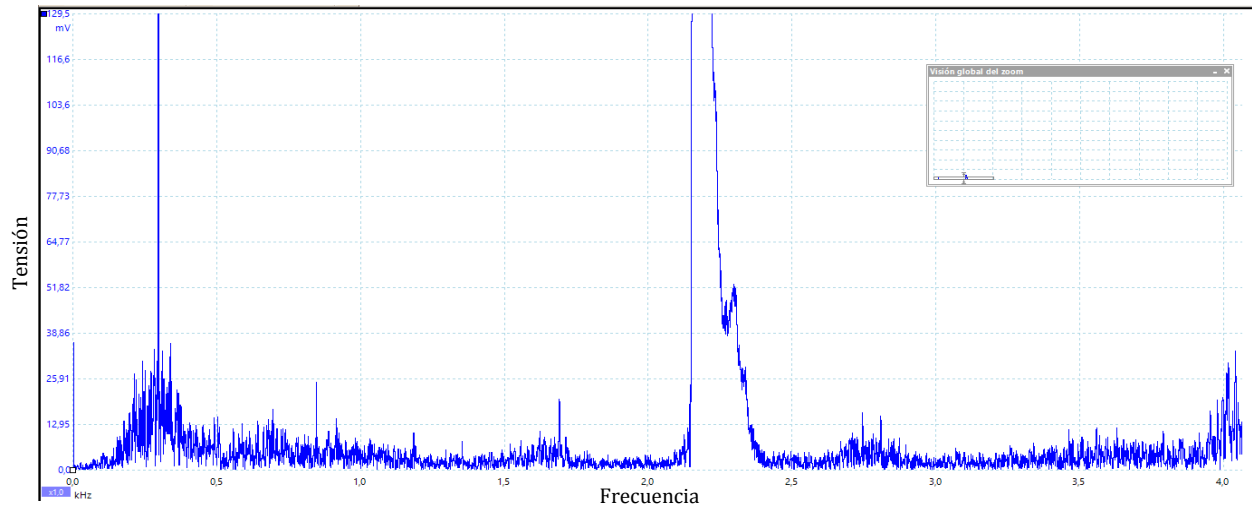


Figura 34. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas en la zona de cancelación, a una distancia $d_1=5\text{cm}$.

7.5 Prueba 5

Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron al realizar la prueba 5.

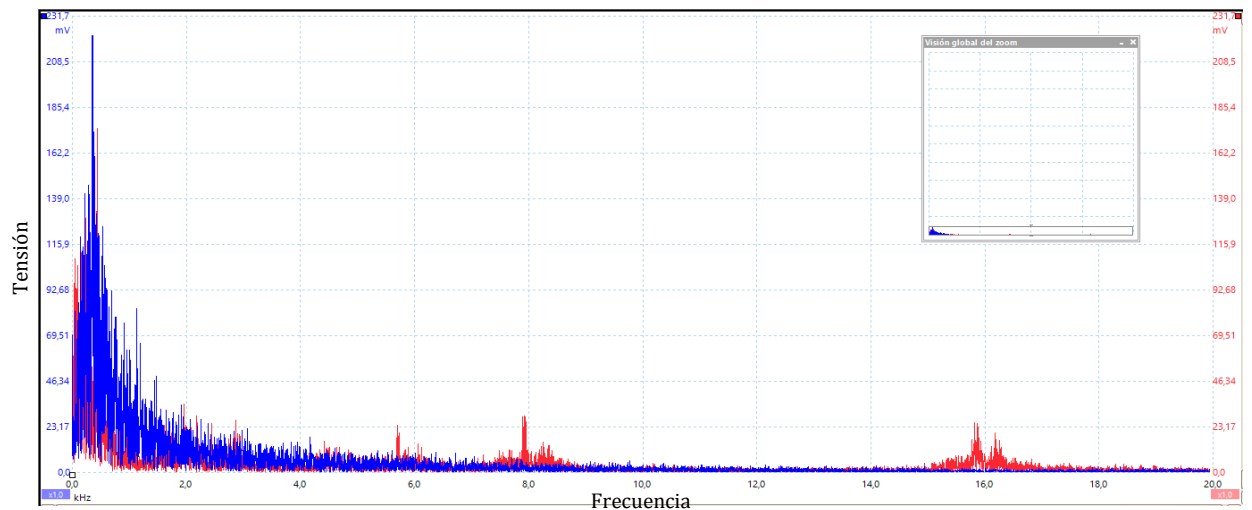


Figura 35. Respuesta en frecuencia producida por un secador, sensado en el punto A (azul) y en punto B (roja) de la tubería.

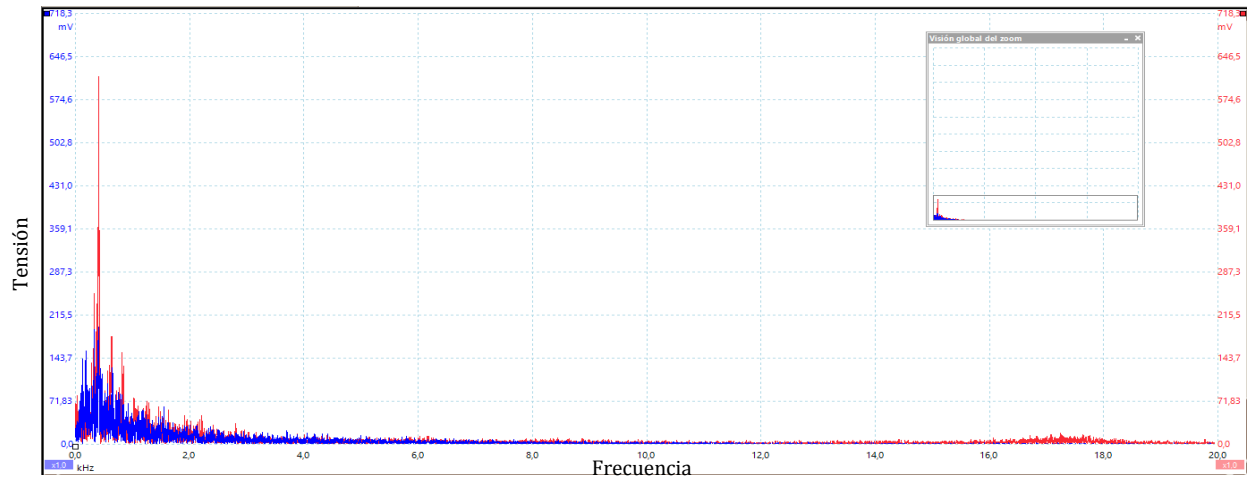


Figura 36. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas a una distancia $d_1=76\text{cm}$. Sensado en el punto A (azul) y en el punto B (roja) de la tubería.

7.6 Prueba 6

Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron al realizar la prueba 6.

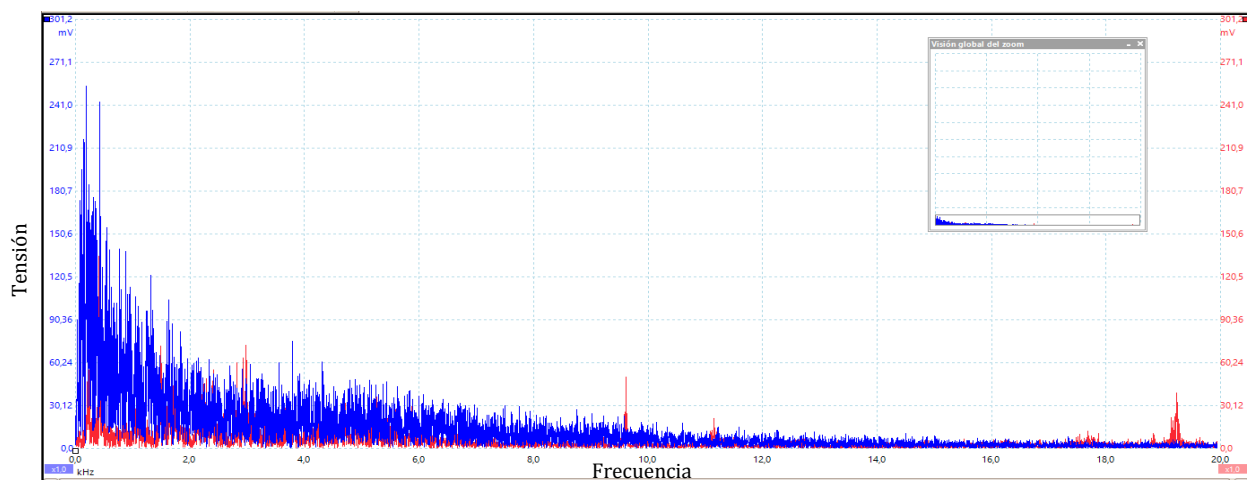


Figura 37. Respuesta en frecuencia del ruido generado por el secador sensando en el punto A (azul) y en el punto B (roja) de la tubería.

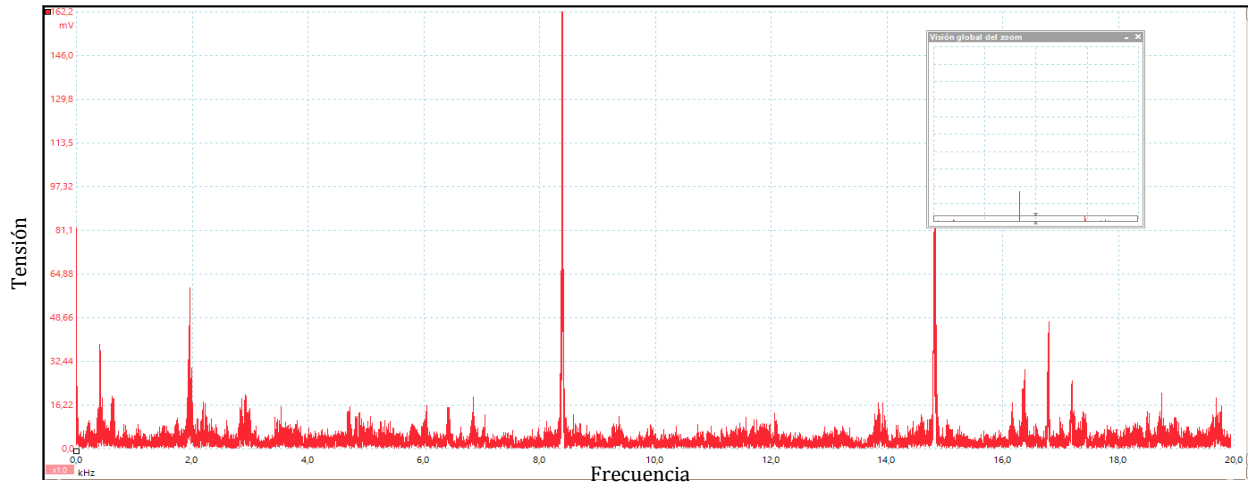


Figura 38. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas a una distancia $d_1=76$ cm. Sensando en el punto B de la tubería.

7.7 Prueba 7

Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron al realizar la prueba 7.

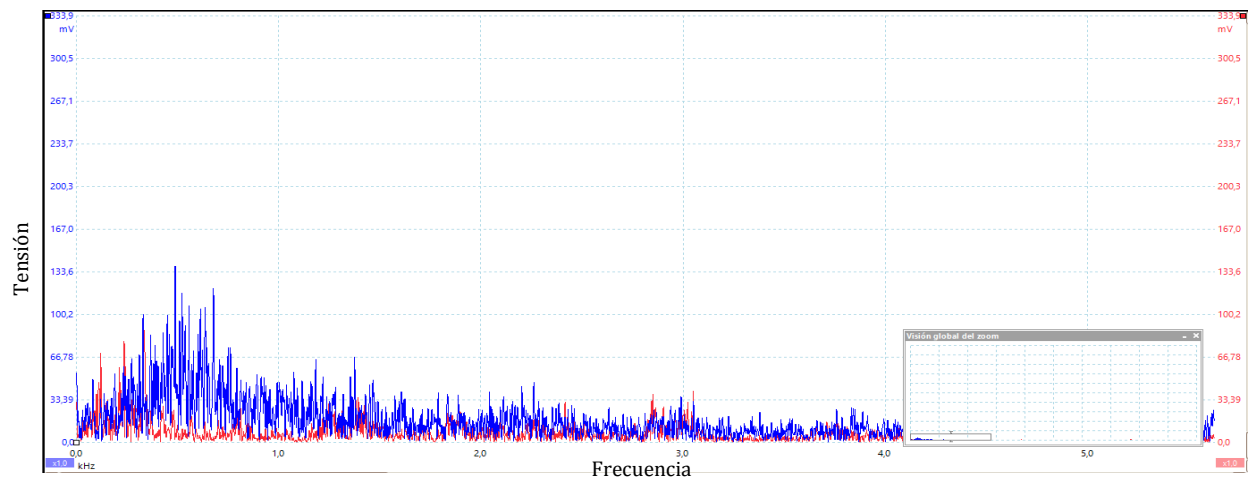


Figura 39. Respuesta en frecuencia del ruido generado por el secador sensando en el punto A (azul) y en el punto C (roja) de la tubería.

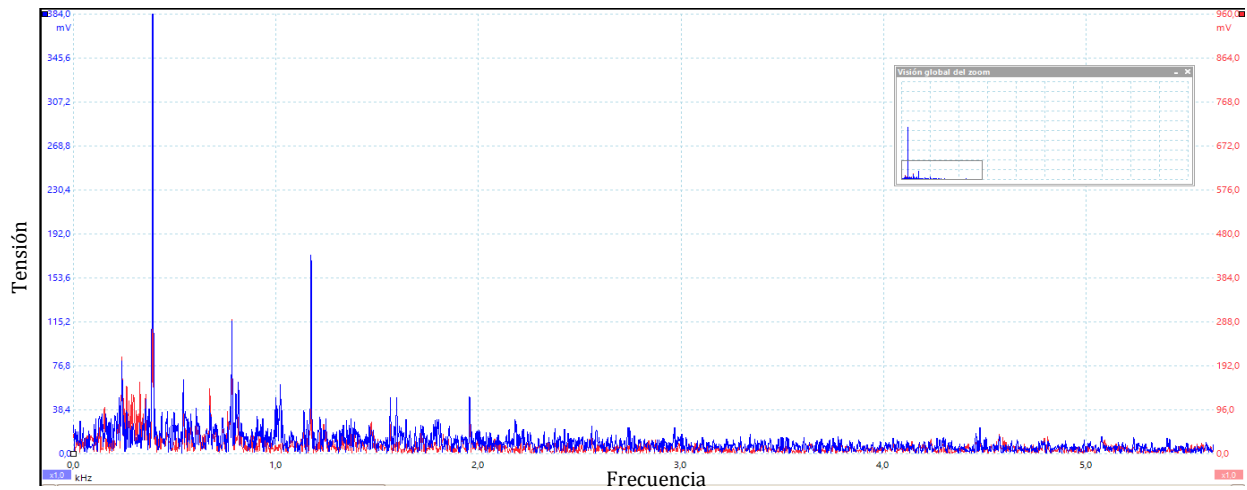


Figura 40. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas utilizando conexión Y a una distancia $OC=65\text{cm}$. Sensando en el punto A (azul) y en el punto C (roja) de la tubería.

7.8 Prueba 8

Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron al realizar la prueba 8.

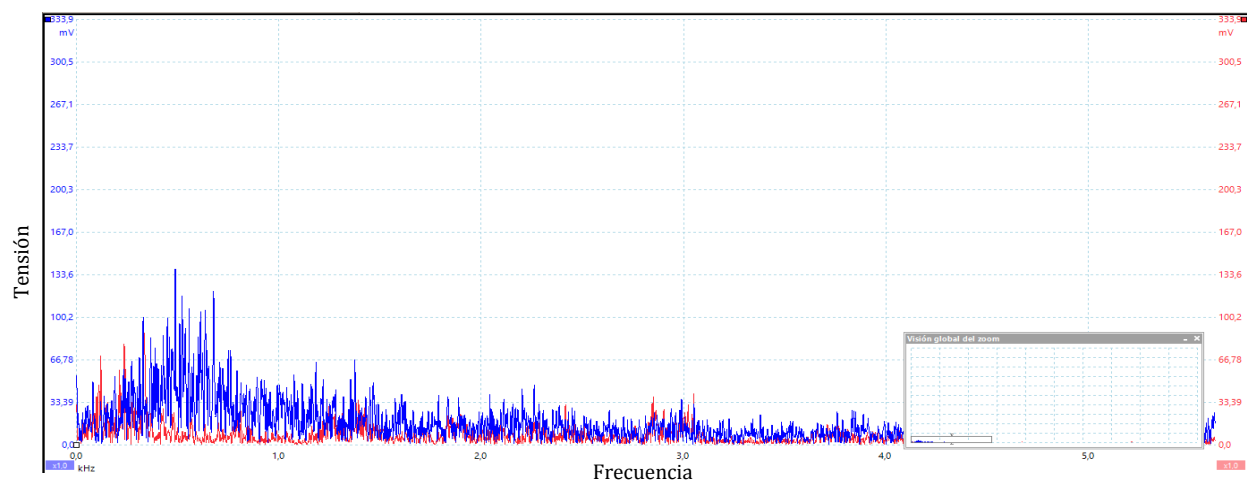


Figura 41. Respuesta en frecuencia del ruido generado por el secador sensando en el punto A (azul) y en el punto C (roja) de la tubería.

7.

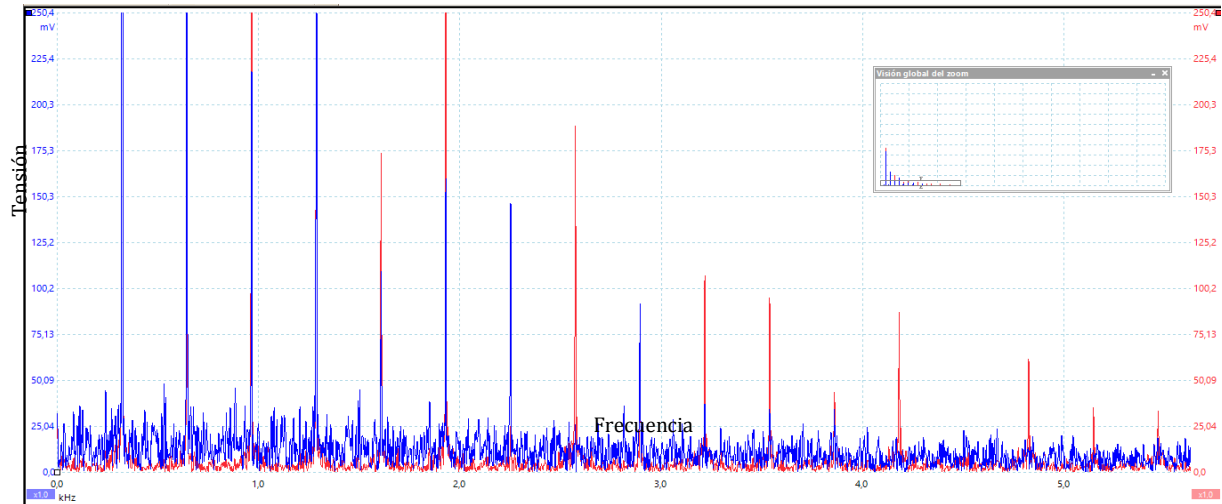


Figura 42. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas utilizando conexión Y e inversor a una distancia $d1=76\text{cm}$. Sensando en el punto A (azul) y en el punto C (roja) de la tubería.

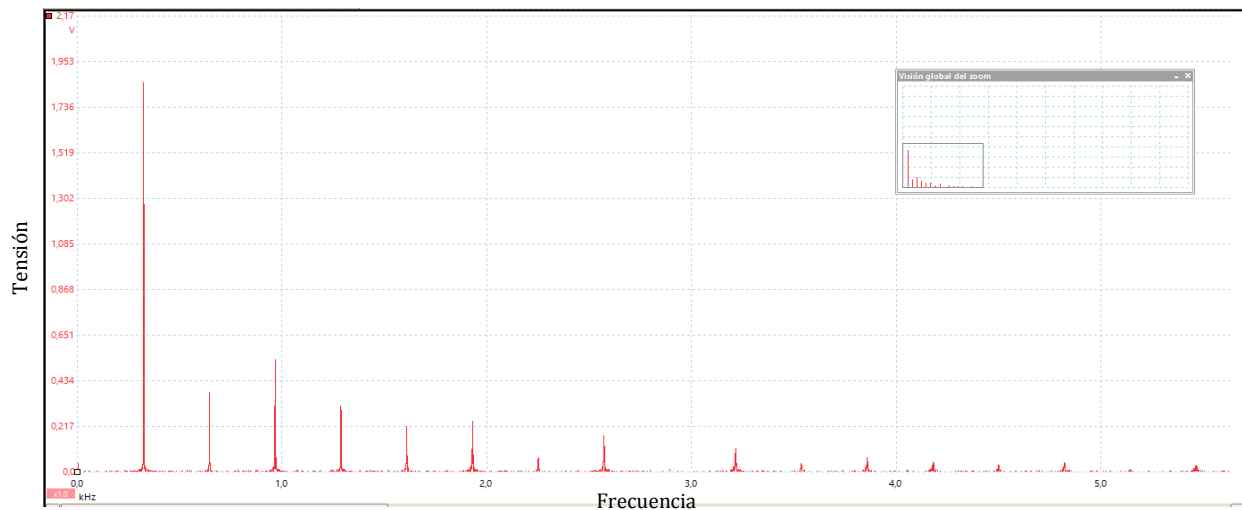


Figura 43. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas utilizando conexión Y e inversor a una distancia $OC=65\text{cm}$. Sensando en el punto C (roja) de la tubería.

7.9 Prueba 9

Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron al realizar la prueba 9.

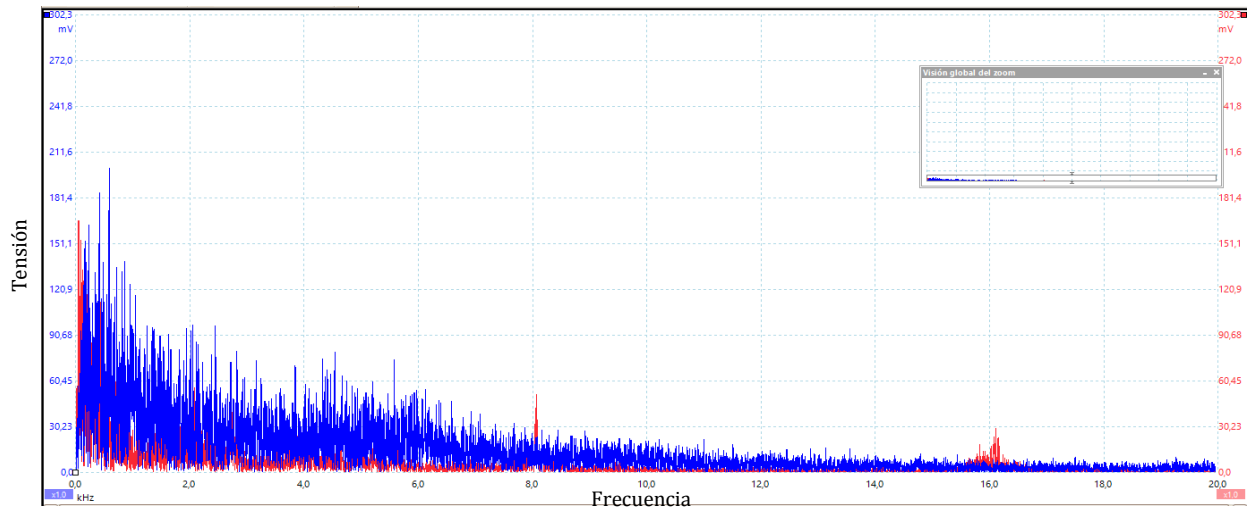


Figura 44. Respuesta en frecuencia del ruido generado por el secador con salida de aire, sensando en el punto A (azul) y en el punto C (roja) de la tubería.

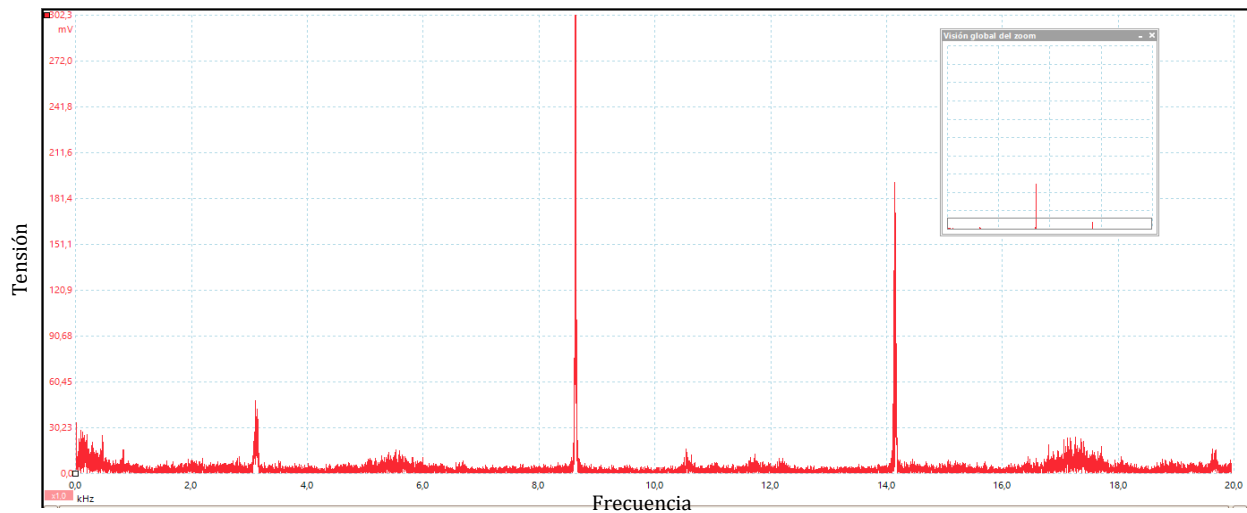


Figura 45. Respuesta en frecuencia de la resultante de la superposición de ondas utilizando salida de aire e inversor a una distancia $OC=13\text{cm}$. Sensando en el punto C (roja) de la tubería.

7.10 Prueba 10

Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron al realizar la prueba 10.

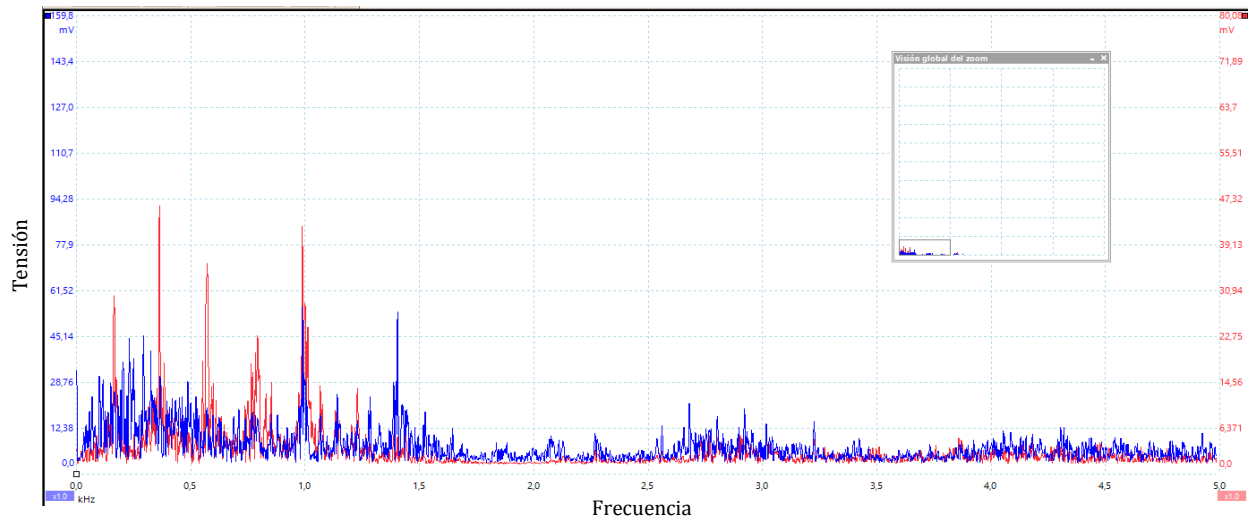


Figura 46. Espectro del ruido generado por el supercomputador en los puntos A (azul) y C (roja).

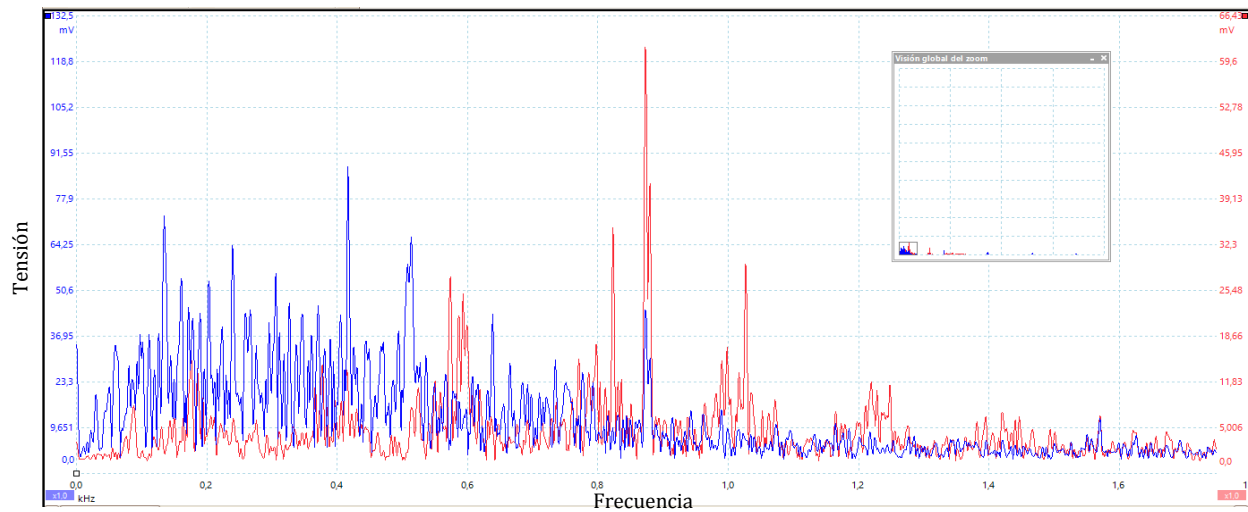


Figura 47. Frecuencia del ruido generado por el supercomputador en los puntos A (azul) y C (roja).

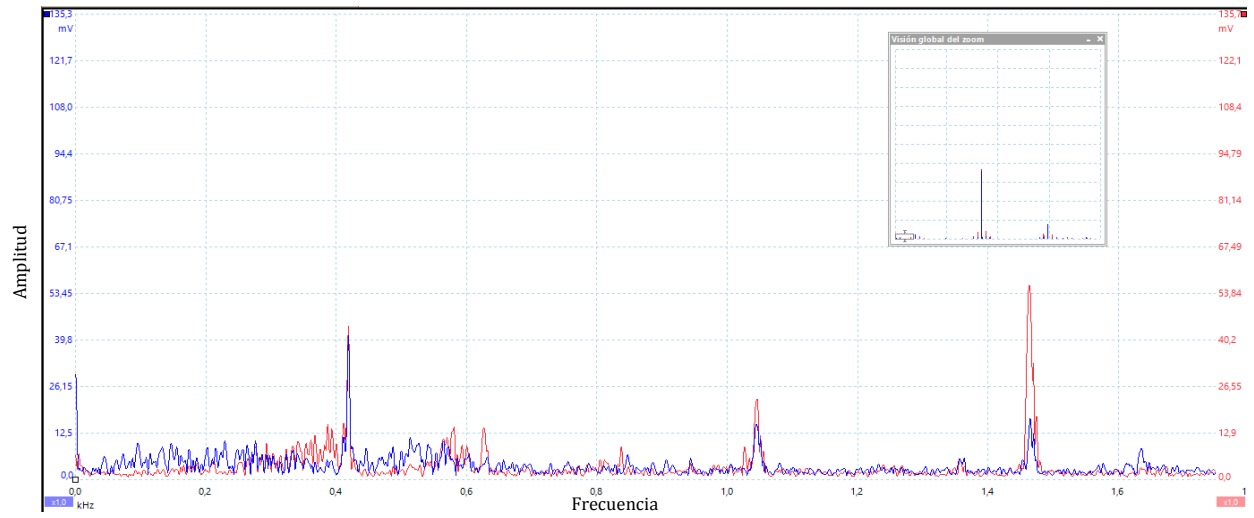


Figura 48. Resultados del algoritmo de control implementado en el supercomputador.

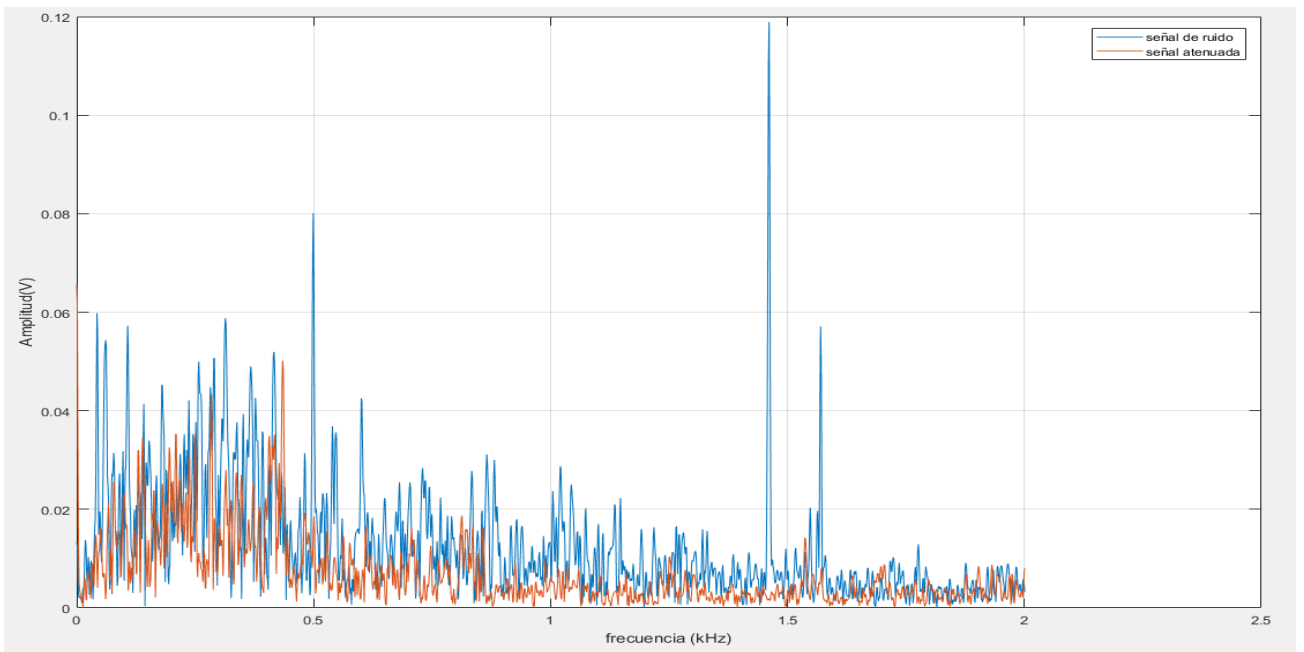


Figura 49. Gráfica comparativa de atenuación en el sensor 1

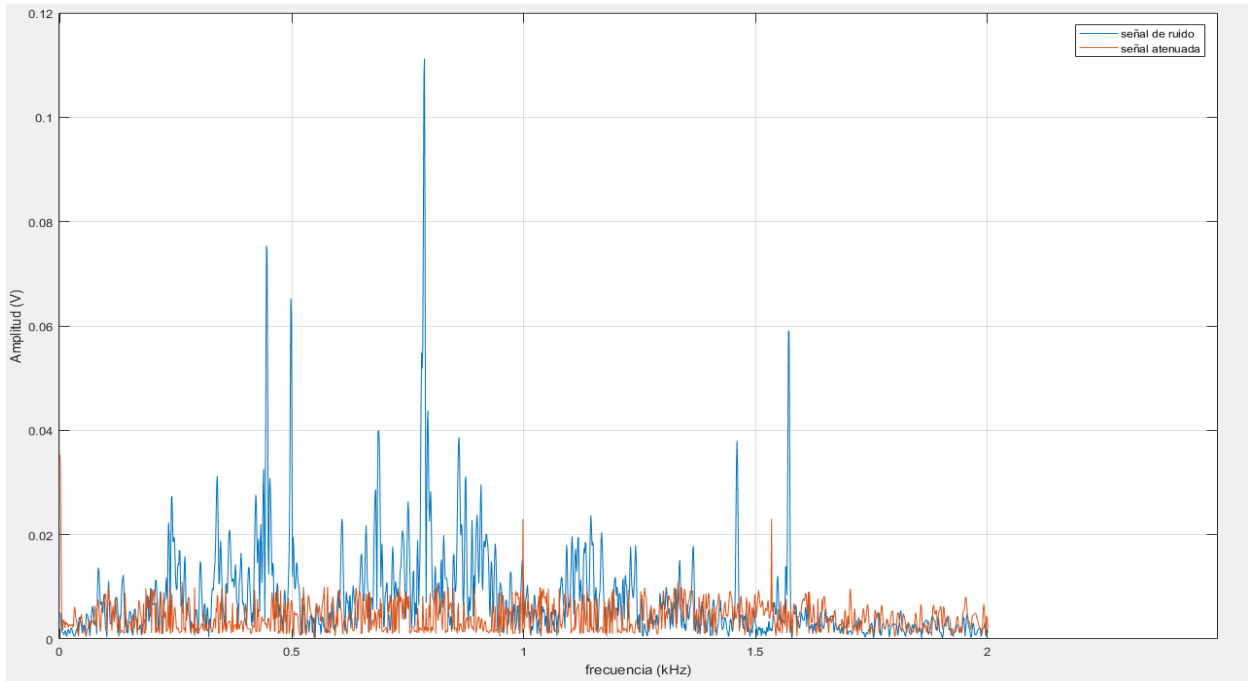


Figura 50. Gráfica comparativa de atenuación en el sensor 2

Tabla 11

Comparación de las señales obtenidas en los sensores 1 y 2

	Señal de ruido (dB)	Señal atenuada (dB)	Atenuación (dB)
Sensor 1	79.92	70.42	9.5
Sensor 2	76.90	45.95	30.95

7.11 Prueba 11

Los resultados mostrados a continuación se obtuvieron al realizar la prueba 11.

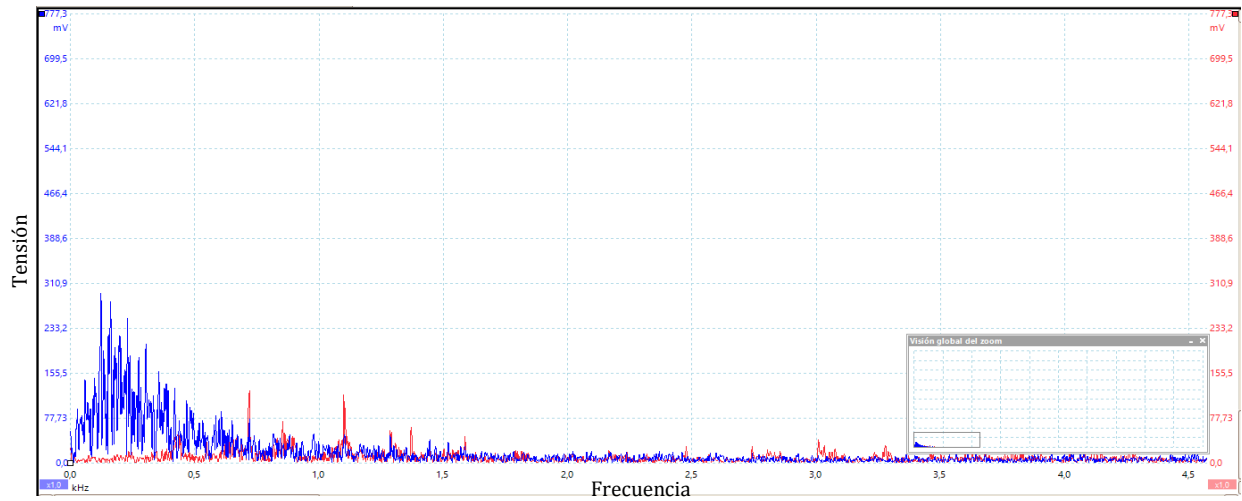


Figura 51. Ruido generado por el Supercóputador en los puntos A (azul) y C (roja).

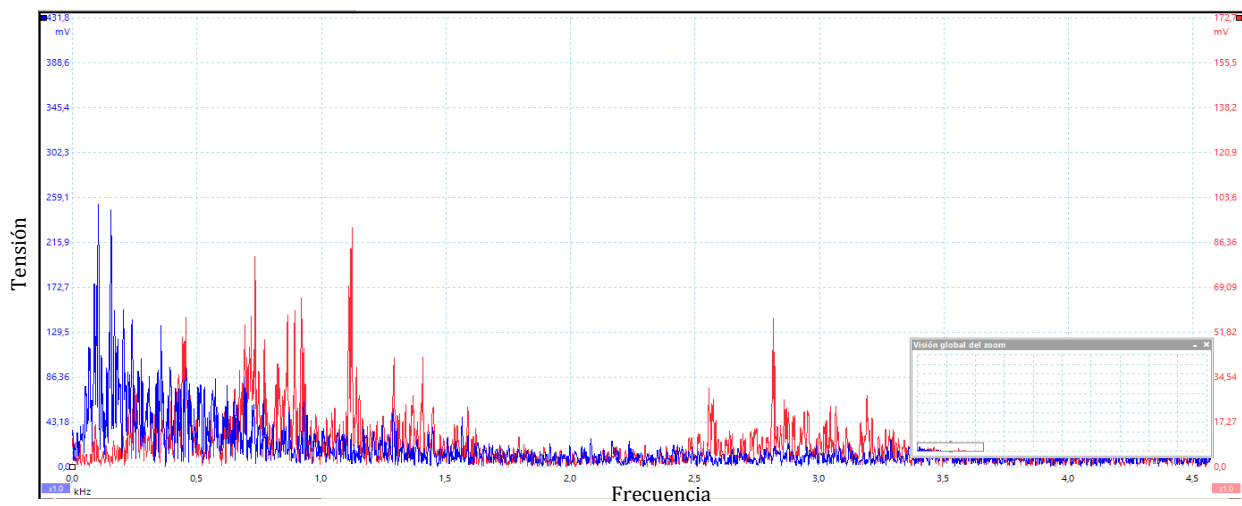


Figura 52. Ruido generado por el Supercóputador en los puntos A (azul) y C (roja).

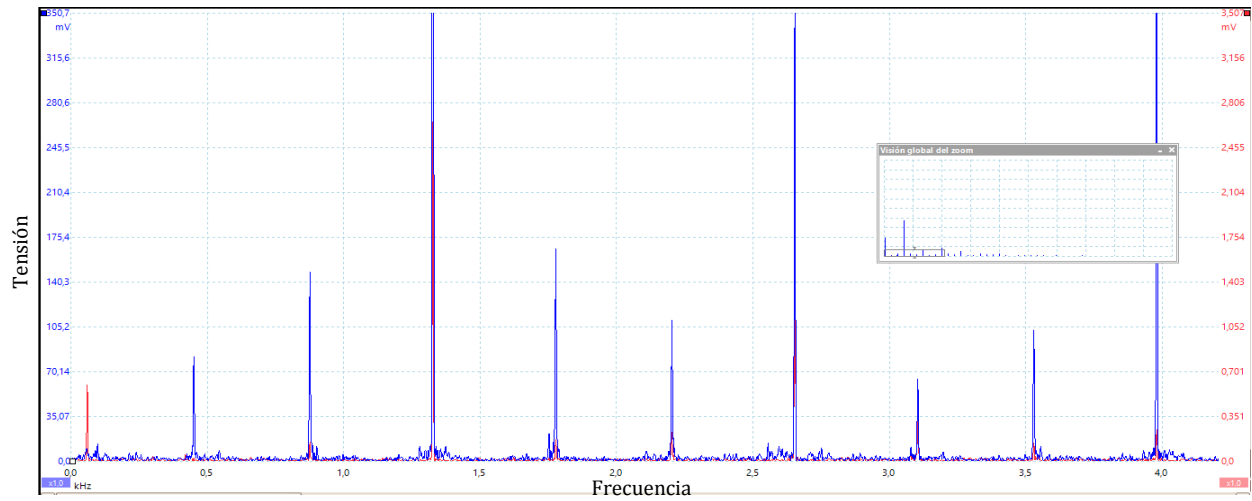


Figura 53. Resultados del algoritmo de control implementado en el supercomputador con tres sistemas acoplados medidas en el punto A (azul) y C (roja).

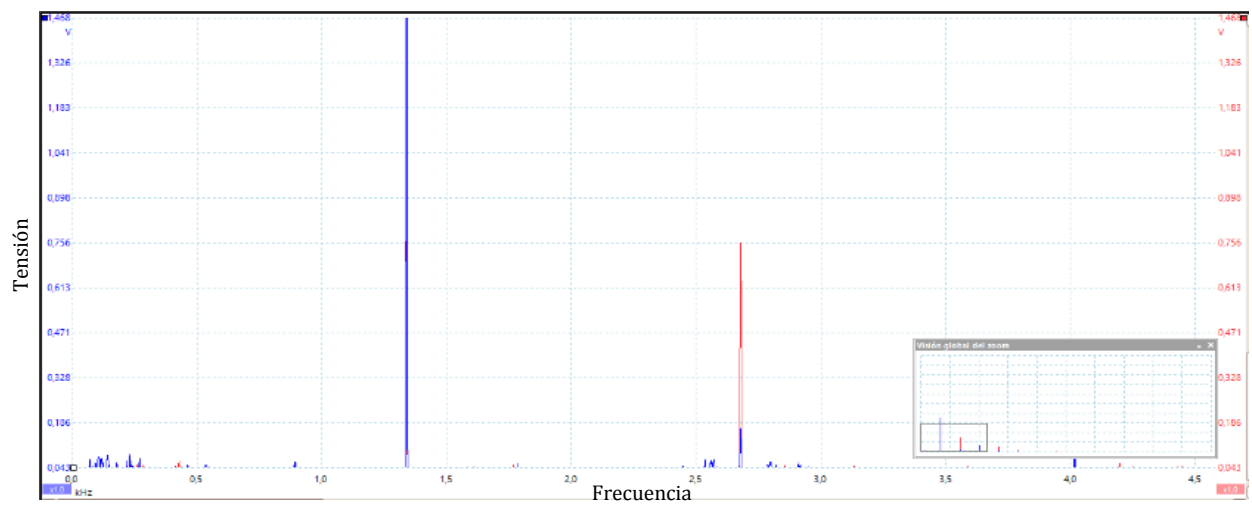


Figura 54. Resultados del algoritmo de control implementado en el supercomputador con tres sistemas acoplados medidas en el punto A (azul) y C (roja).

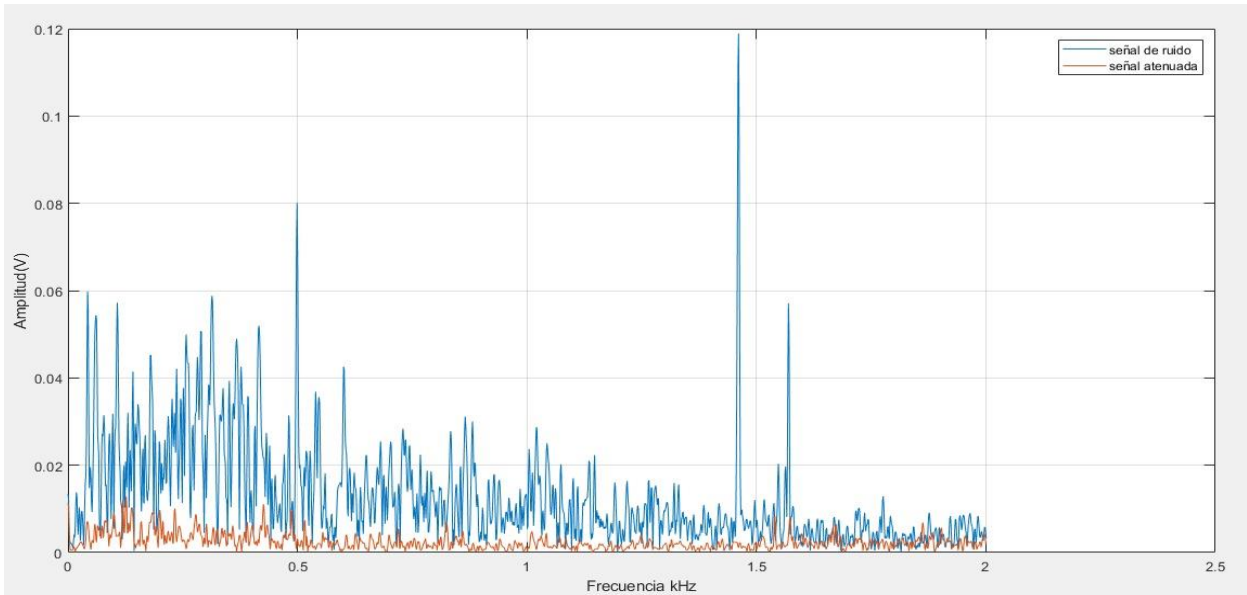


Figura 55. Gráfica comparativa de atenuación en el sensor 1

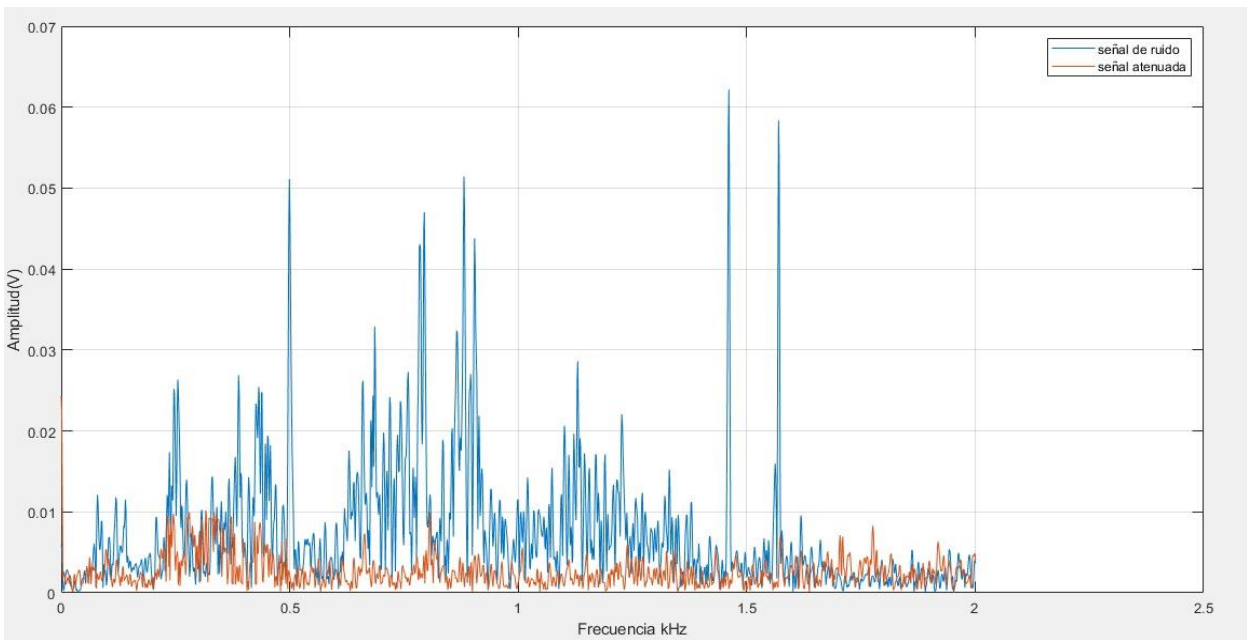


Figura 56. Gráfica comparativa de atenuación en el sensor 2

Tabla 12

Comparación de las señales obtenidas en los sensores 1 y 2

	Señal de ruido (dB)	Señal atenuada (dB)	Atenuación (dB)
Sensor 1	78.92	70.42	8.5
Sensor 2	100.69	49.66	51.03

8. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos del sistema de atenuación activo de ruido serán mostrados a continuación.

8.1 Prueba 1

Los resultados presentados en el literal 6.1, demuestran la definición de cancelación destructiva, obteniendo resultados favorables para la implementación de esta metodología. Se observó que para señales periódicas la variación de la distancia influye en la cantidad de atenuación que se produce en la zona de silencio, esto es debido a que la distancia y la fase de onda se encuentran directamente relacionadas. Por el contrario, las señales no periódicas no presentan esta característica, de esta forma se denota que la atenuación es más efectiva al disminuir la distancia *dl*.

8.2 Prueba 2

Los resultados presentados en el literal 6.2, describen el funcionamiento del controlador de acuerdo con la distancia de la señal de atenuación. Como se puede observar la atenuación varía en función de la distancia para señales periódicas teniendo un comportamiento similar a la prueba anterior.

Para distancias menores a 28 cm o mayores a 32 cm se incrementa la cantidad de ruido resultante de la superposición. Para distancias cercanas a 30 cm o múltiplos de esta, se generan atenuaciones en la señal resultante, obteniendo buenos resultados.

8.3 Prueba 3

Los resultados presentados en el literal 6.3, demuestran el funcionamiento del controlador según la variación de la distancia de la señal inversa. Como se ha observado la distancia es importante en señales periódicas. Al aplicar el inversor disminuye la distancia a la cual se produce la mayor atenuación, presentando los mejores resultados en la distancia de 0 cm. En esta prueba se pudo observar un parámetro importante en la implementación del sistema, y es debido a la alineación que deben tener las señales que se enfrentan, ya que si no se encuentran bien alineadas la atenuación no será tan efectiva.

8.4 Prueba 4

Los resultados presentados en el literal 6.4 describen la afectación que tiene implementar el filtro inversor, estas demuestran que para tonos que se encuentren entre el ancho de banda del filtro inversor los resultados serán los mismos que el literal anterior, por lo que para apreciar la influencia del filtro inversor la señal de ruido debe contener componentes al menos entre 500 a 2500 Hz. Si se cumple lo anterior se realiza una atenuación efectiva para el ancho de banda para el cual se diseñó el filtro, el resto de las bandas no se ve afectadas de forma positiva presentando aumento o

disminución. En cuanto a la distancia dI presenta las mismas características que la prueba anualizada en el literal anterior.

8.5 Prueba 5

Los resultados presentados en el literal 6.4, describen el funcionamiento de la configuración determinada 5.4 para este ítem. Como se pudo observar la atenuación no es efectiva para la distancia de 76 cm para ninguno de los dos casos, dado que la señal de ruido es más alta que la resultante de la superposición. Realizando cambios en la distancia del tubo se pudo observar mejoras no significativas. Debido a la implicación que tiene el modo cero dentro del tubo, el cual indica la distancia mínima a la cual se puede generar la atenuación desde esa distancia en adelante sin influir en las demás.

8.6 Prueba 6

Los resultados presentados en el literal 6.6, describen el funcionamiento de la configuración determinada 5.6 para este ítem. Una observación importante es que el inversor permitió disminuir la distancia dI , con la cual se obtienen los mismos resultados de atenuación que la prueba anterior. En esta prueba es importante tener en cuenta que la señal de mayor amplitud observada en los resultados se debe al efecto *feedback* que se produce entre el micrófono y el altavoz. Analizando el resto de componentes se aprecia una atenuación aceptable en la mayor parte del espectro de frecuencia de la señal resultante en la zona de atenuación. Por tal motivo se valida que el sistema

ANC utilizado para adquirir estos resultados es efectivo a la hora de realizar atenuación para sistemas de extracción de calor.

8.7 Prueba 7

Los resultados obtenidos en el literal 6.7, describen el funcionamiento mencionado en el literal 5.7 donde se observa que para una señal conocida es viable utilizar esta configuración, pero para señales variantes en el tiempo, las cuales el punto de cancelación (modo cero) va a depender de la longitud de la onda y así mismo depender de agregar un desfase correcto a la señal de atenuación, hace que sea imprecisa la prueba al tener que aumentar la longitud de los tubos hasta encontrar un punto de cancelación.

8.8 Prueba 8

Los resultados obtenidos en el literal 6.8, describen el funcionamiento mencionado en el literal 5.8. Analizando la configuración, es notable que el circuito inversor genero simplicidad y precisión al momento de obtener el modo cero, obteniendo una reducción en la amplitud de la señal resultante. La longitud de los tubos juega un papel fundamental, debido a que se tiene que garantizar al menos una longitud de onda a la cual se forme un modo cero (modo de cancelación). Detallando los resultados en la zona de silencio se observa la presencia de una gran cantidad de armónicos, estos se dan como resultado del efecto de realimentación o de la forma en la cual se realiza el enfrentamiento de ondas, haciéndolo poco eficiente.

8.9 Prueba 9

Los resultados presentados en el literal 6.9, describen el funcionamiento dado a la salida de aire que se encuentra en la parte superior del tubo. Como podemos observar la atenuación varía en función de la ubicación de la salida de aire, si se compara la señal a cancelar con la señal resultante de la superposición de ondas observaremos que la primera posee más amplitud que la segunda exceptuando unas frecuencias específicas. Estas frecuencias son debido al efecto *feedback* mencionado en pruebas anteriores, para evitar esta resultante es posible utilizar ecualizadores que atenúen esta realimentación obteniendo mejores resultados. Dado lo anterior se analiza el resto de las componentes obtenidas teniendo como resultado una atenuación destructiva exitosa, para algunas distancias en las cuales se ubicó la salida de aire. La distancia con la cual presenta mejores resultados cambia según la frecuencia máxima y mínima que entrega la fuente de ruido. Una implicación importante al generar esta salida de aire es que, para obtener resultados similares a anteriores pruebas, es necesario aumentar la ganancia en la señal de atenuación.

8.10 Prueba 10

Los resultados obtenidos en el literal 6.10, describen el comportamiento de la señal de ruido generada por el supercomputador aplicando el controlador diseñado, como se puede observar al igual que en pruebas anteriores con otros tipos de ruido se obtiene una atenuación aceptable para los niveles de ruido encontrados en esta sala.

Esta configuración resulta ser efectiva, dando como resultado un nivel de atenuación de 30.95 dB en la zona de cancelación.

8.11 Prueba 11

Los resultados obtenidos en el literal 6.11, describen el comportamiento de la señal de ruido generada por el supercomputador. Al aplicar el sistema modular de tres secciones se genera una atenuación efectiva de 51.03 dB en el punto **B** (punto medio de la configuración de tres secciones). Se observa un pico producido por el efecto *feedback* generado entre los micrófonos y parlantes debido al aumento de ganancia. La estructura diseñada para la extracción de calor es efectiva en la práctica porque no afecta el comportamiento de las ondas de atenuación.

9. Conclusiones

Las señales de contrafase generadas por el inversor proporcionan distancias más cortas para una destrucción de ondas más efectiva comparada con la superposición de ondas efectuada directamente de la fuente de ruido permitiendo realizar configuraciones de menor tamaño.

Al direccionar el ruido producido por el supercomputador se evita la dispersión libre de las ondas en el medio permitiendo concentrar la mayor cantidad de ruido, lo que hace la superposición de ondas óptima. También permite encontrar el modo cero logrando frente de ondas planos para la atenuación.

La señal de atenuación debe tener gran amplitud para poder realizar atenuación en el medio de propagación. Debido a esto el efecto *feedback* se ve amplificado y genera nuevas componentes de amplitudes considerables por lo que es necesario el uso de un ecualizador para mitigar este efecto.

La implementación del sistema de control propuesto depende únicamente de los parámetros de la onda de ruido generada, es necesario estudiar su comportamiento en el espacio de propagación y obtener el modelo dinámico para calcular la distancia donde se podrá obtener la zona de atenuación y así ubicar correctamente los elementos que componen el sistema de reducción.

La estructura modular resulto favorable en la implementación debido a que permite mantener una concentración de onda en el punto de atenuación, su diseño permite realizar un montaje sencillo y de fácil acceso al controlador y elementos del sistema teniendo en cuenta el trabajo futuro que se contempla en el proyecto.

10. Trabajo futuro

Este proyecto puede continuar si se realiza la implementación total de la caja acústica propuesta en la *Figura 57*, esta estructura está pensada para afrontar el problema de ruido acústico generado por el sistema de extracción de calor del supercomputador.

Se propone una estructura diseñada a partir de la *configuración 11*, esta podría estar conformada por un sistema de montaje modular, pensando en posibles daños en equipos además de facilidad al momento de su construcción. La estructura forma una caja acústica en donde cada ventilador cuenta con un sistema de cancelación para mayor reducción de ruido, esta caja debe llevar un revestimiento interior de un material que permita atenuar la señal resultante aplicando el método de cancelación pasiva.

Es fundamental no perder la función principal del sistema de extracción de calor, por tal motivo la caja de acústica debería tener un sistema que permita aislar el calor por medio de canales de salida de aire caliente por la parte superior ver (*Figura 57*).

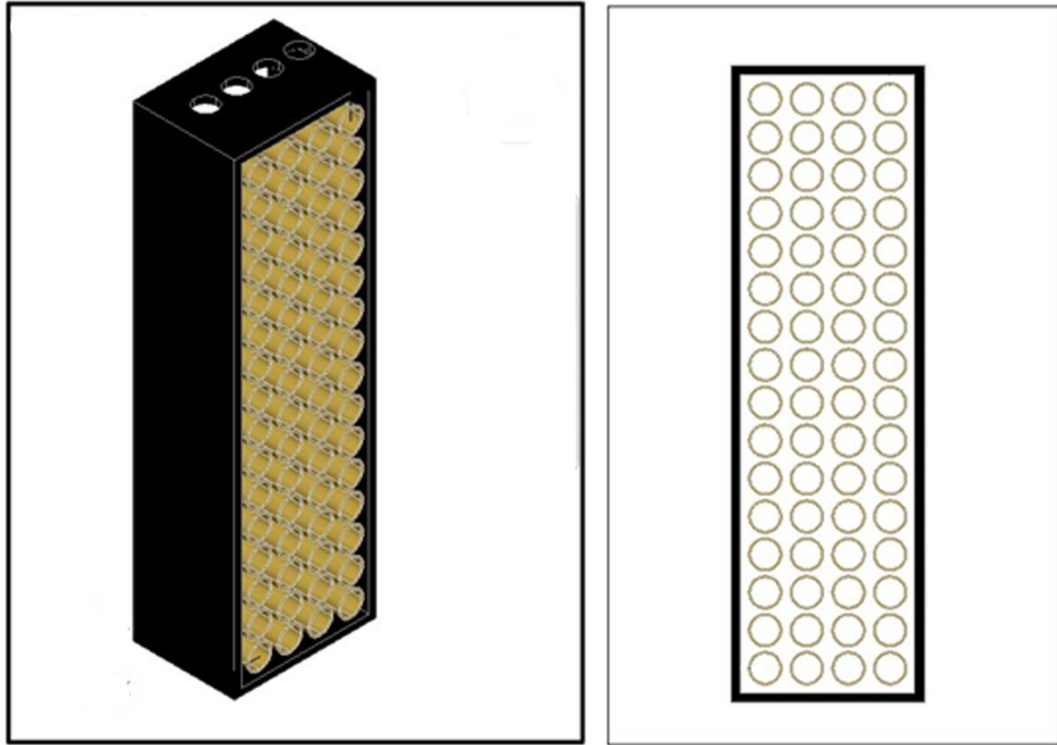


Figura 57. Implementación completa de un sistema de control para múltiples fuentes de ruido iguales.

Referencias Bibliográficas

"Acústica". (s.f.). Paraninfo.

"Descripción equipos de audio". (s.f.). Obtenido de http://www.unpa.edu.ar/sites/default/files/descargas/Administracion_y_Apoyo/4.%20Materiales/2015/T228/Equipos%20de%20audio.%20Microfonos.pdf

Aranda, A. R. (2000-2001). *Los micrófonos en Acústica*. Obtenido de http://electronica.ugr.es/~amroldan/noticias/microfonos_en_acustica.pdf

Avilés Zavala, E. A. (2018). *Diseño y construcción de sistema de control activo de ruido en ductos*. (Tesis pregrado en Sonido y Acústica). Universidad de las Américas, Facultad de ingeniería y ciencias agropecuarias. .

Budde, L. (2013). *Sistema de Control Activo de Ruido Acústico Periódico para el Interior de Automóviles*. (Tesis pregrado en Ingeniería Electrónica). Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Córdoba.

Cabrera Ortiz, J. G. (2010). *ACUSTICA Y FUNDAMENTOS DEL SONIDO (E-Learning)*. (Contenido didáctico del curso Acústica y Fundamentos Del Sonido). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería. Bogotá. Obtenido de https://www.arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_377.pdf

Casas García, O., Betancur Vargas, C. M., y Montaña Erazo, J. S. (2015). Revisión de la normatividad para el ruido acústico en Colombia y su aplicación. *Entramado*, 11(1), 264-286.

Echeverri Londoño, C. A., y Gonzáles Fernandez, A. E. (2011). PROTOCOLO PARA MEDIR LA EMISIÓN DE RUIDO GENERADO POR FUENTES FIJAS. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18), 51-60.

- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. (2011). *Laboratorio de Condiciones de Trabajo. Ergonomía*. Obtenido de https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/8312_ergonomia_de_pie.pdf
- Lueg, P. (1936). *Estados Unidos Patente n° 2.043.416*.
- Martínez Llorente, J., y Peters, j. (2015). *Contaminación acústica y ruido*. Madrid: Ecologistas en acción .
- Mínguez Olivares, A. (1998). *Ingeniería Avanzada para Sistemas de Control de Ruido Acústico mediante Técnicas Adaptativas*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicacion Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. Madrid.
- Miyara, F. (2006). *Acústica y Sistemas de Sonido*. Rosario: UNR Editora.
- Peña, E., y Cuando, G. (2009). *Sonido Directivo*. (Tesis pregrado en Ingeniería de Comunicaciones y Electrónica). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México, D.F.
- Pérez, J., y Delgado, M. (s.f.). *Equipos de Sonido: Dpt° Electrónica*. Obtenido de <http://www.ieslosviveros.es/electronica/material/asig10/2MicrofonosdefPDF.pdf>
- Quintero, A. (2012). *Estudio de las Tendencias de los Sistemas de Sonido para Espectáculos Masivos Tipo Concierto*. (Tésis de pregrado en Ingeniería Electrónica). Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Electrónica, Santiago de Cali.
- Ramos Romero, C. A. (2010). *Medición de pérdida por inserción por acoplamiento de silenciadores en ductos de flujo de aire*. (Tesis de pregrado en Sonido y Acústica). Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias.
- Sánchez, A., y Sánchez Remón, A. (2016). *Técnicas de cancelación del ruido basadas en algoritmos genéticos*. (Tesis pregrado). Universidad Zaragoza, Escuela universitaria politécnica de teruel. Teruel.
- Tekavčič, M. (2010-2011). *Active noise control*. (Seminario). Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko.

Apéndices

Apéndice A. Circuito de control implementado.

A continuación, se presenta el esquema del circuito de control implementado en este proyecto, que consta de un sistema de pre-amplificación de la señal de audio, seguido por un controlador encargado de invertir la fase de la señal de entrada y enviarla al sistema de actuación (Parlantes).

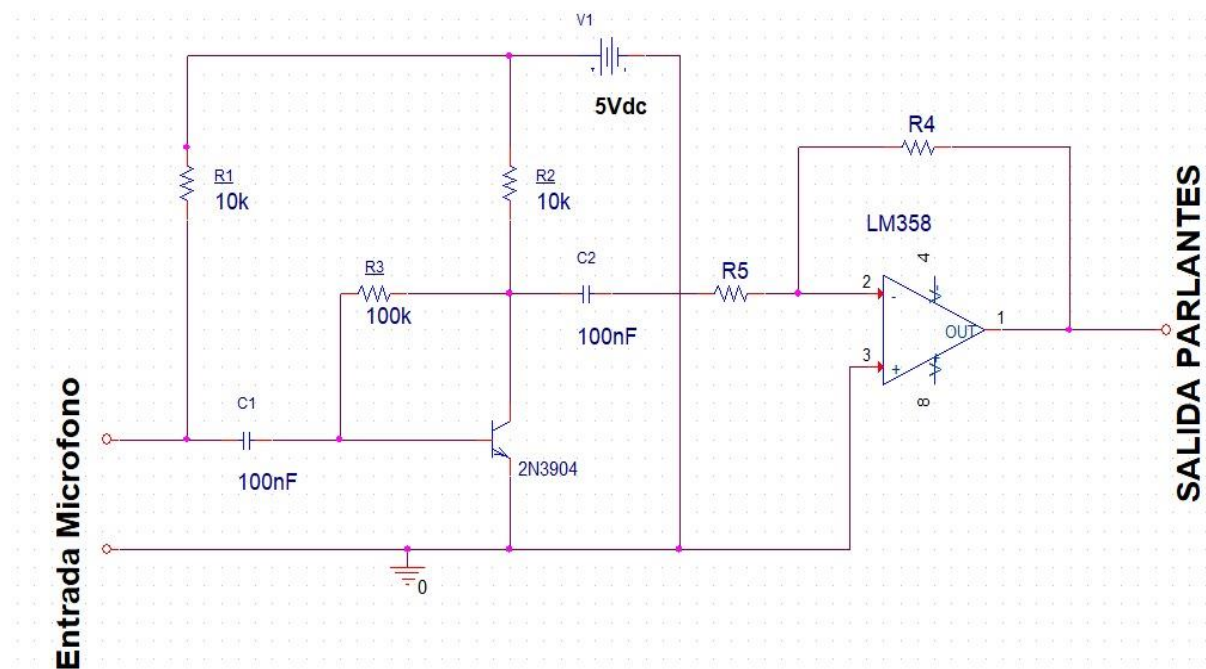


Figura 58. Circuito del sistema de control implementado.

Apéndice B. Circuito impreso.

El controlador analógico diseñado (ver *Figura 59*) presenta una estructura compacta y practica que se adapta a la estructura deseada, este circuito impreso permite el desarrollo del montaje modular de la estructura completa pensada para el desarrollo total del proyecto.

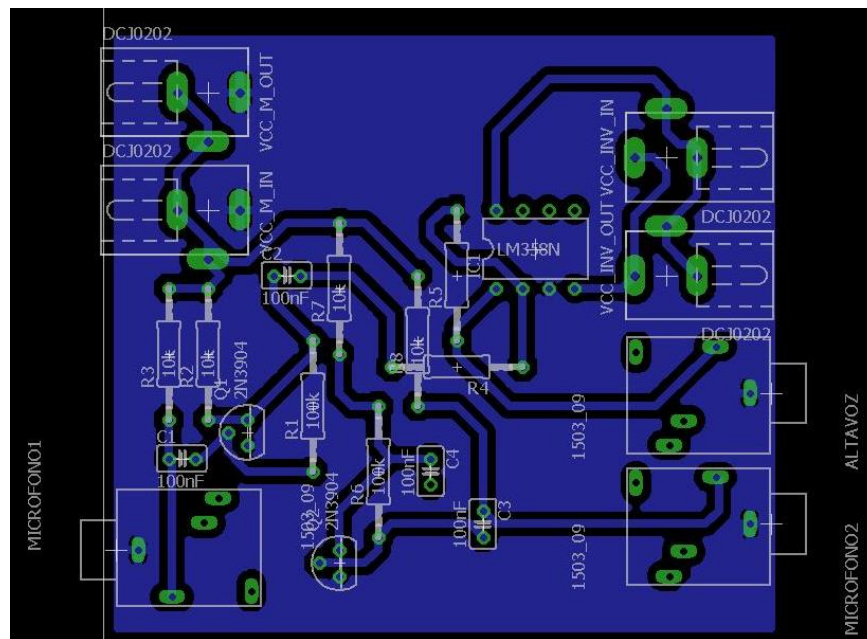


Figura 59. Circuito impreso del controlador.

Apéndice C. Datasheet micrófono electret.

El Micrófono utilizado en este proyecto fue el micrófono Electret MO093803-2, en la *Figura 60*; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la hoja de datos, donde se muestran datos importantes del micrófono como la respuesta en frecuencia, directividad y sensibilidad.

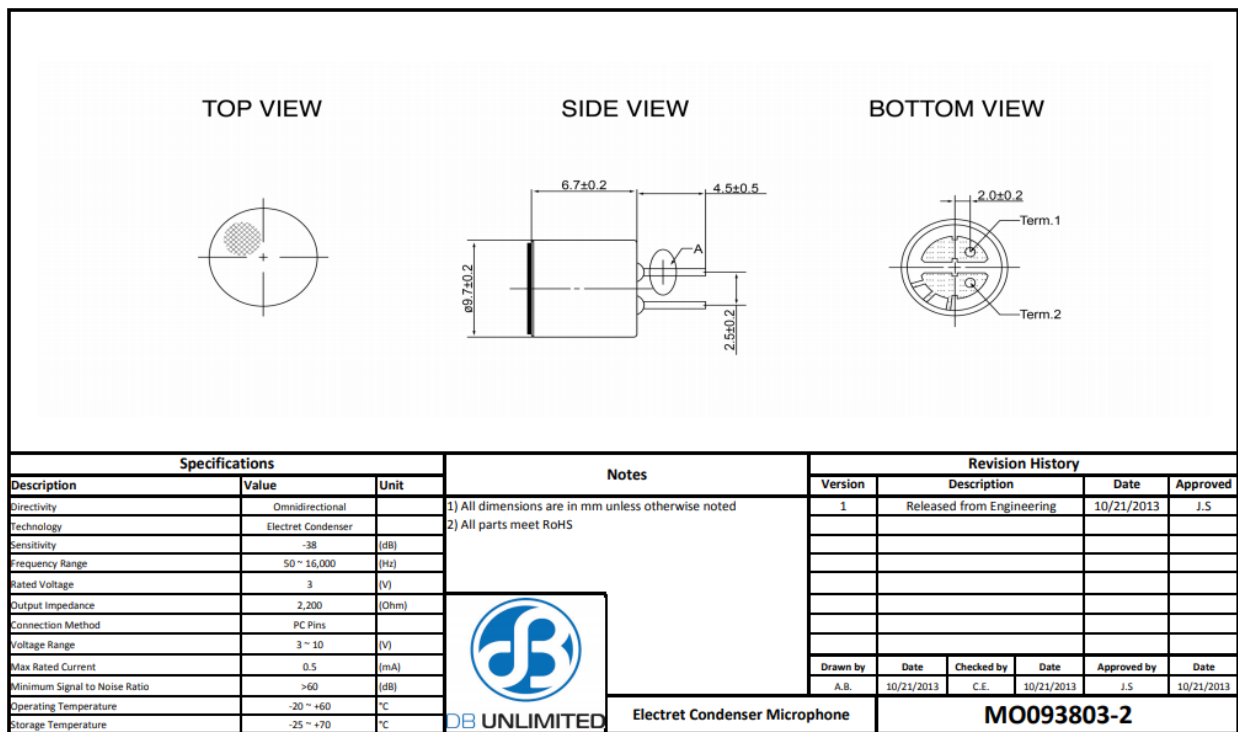


Figura 60. Hoja de datos micrófono electret MO093803-2.