



Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica**

**Diseño de un sistema de retroalimentación adaptativa para la cancelación
de ruido urbano en amplificadores de audio**

Tesis presentada por:

Rios Castillo, Carlos Andree

ORCID: 0009-0008-9638-9036

para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Asesor (a):

Dr. Sulla Torres, Raul Ricardo

ORCID: 0000-0002-4435-3575

Arequipa – Perú

2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA ELECTRONICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 11 de Junio del 2026

Dictamen: 014163-C-EPIE-2026

Visto el borrador del expediente 014163, presentado por:

2018224611 - RIOS CASTILLO CARLOS ANDREE

Titulado:

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RETROALIMENTACIÓN ADAPTATIVA PARA LA CANCELACIÓN DE
RUIDO URBANO EN AMPLIFICADORES DE AUDIO**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO ELECTRONICO

**29715414 - COAGUILA GOMEZ RONALD PERCING
DICTAMINADOR**



**29364669 - QUISPE YAUYO JUAN MEDARDO
DICTAMINADOR**



**29565731 - COPA PINEDA JUAN CARLOS
DICTAMINADOR**



DISEÑO DE UN SISTEMA DE RETROALIMENTACIÓN ADAPTATIVA PARA LA CANCELACIÓN DE RUI EN AMPLIFICADORES DE AUDIO

INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

3%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1

1library.co

Fuente de Internet

2

Submitted to Nottingham Trent University

Trabajo del estudiante

3

hdl.handle.net

Fuente de Internet

Excluir citas

Excluir bibliografía

Apagado

Apagado

Excluir coincidencias

< 1%

DEDICATORIA

A mis padres Carlos, Xiomara y a mi querida hermana Yanira por su guía, confianza y sobre todo su perseverancia en cada uno de los pasos de este camino académico.

Su respaldo que fue la fuerza que me permitió superar todos los retos y poder alcanzar la meta de lograr completar esta carrera, la cual me abrió puertas al empleo que hoy en día me desenvuelvo.

Además, también quiero dedicar esta tesis a mis abuelos Carmen y Héctor que fueron en cierta parte mi ayuda para motivarme y seguir siempre, aunque el camino se pusiera difícil, ahora que están en el cielo les doy las gracias por siempre apostar en mí.

A todos les dedico este logro con gratitud y respeto.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mis dos padres Carlos, Xiomara y hermana Yanira, por todo su apoyo constante, su confianza y por ser uno de los pilares fundamentales en todas las etapas de mi formación personal y profesional. Su esfuerzo y dedicación han sido siempre la base que me permite llegar hasta el día de hoy.

De manera muy especial, dedico estas palabras a mis abuelos Carmen y Héctor, quienes hoy se encuentran en el cielo, pero siempre su presencia de amor y enseñanza continúan acompañándome cada día, aunque físicamente ya no estén conmigo han sido la fuente de mi fuerza, inspiración y motivación para seguir adelante.

Su recuerdo vive dentro de mi corazón y este logro también les pertenece.

A todos mis docentes y asesores, por compartir todos sus conocimientos, orientación y criterio técnico, los cuales fueron esenciales para poder desarrollar esta investigación. Su exigencia académica contribuyo significativamente para lograr fortalecer mi formación como ingeniero electrónico.

De manera especial, agradezco a mi asesor de tesis, por la guía, paciencia y apoyo durante todo el proceso del desarrollo de mi trabajo aquí presente, así también como todos sus aportes técnicos valiosos que me permitieron presentar una tesis de calidad.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente también formaron parte de este logro, brindándome su apoyo, confianza y la motivación para poder concretar esta importante etapa de mi vida.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación aborda el desarrollo de un sistema de retroalimentación adaptativa para la cancelación de ruido urbano en amplificadores de audio de alta potencia, orientado a mejorar la calidad sonora en entornos urbanos como oficinas y hogares en Perú. El proyecto surge ante la creciente contaminación acústica urbana, que afecta la salud, el bienestar y la experiencia auditiva de los usuarios.

El sistema diseñado incorpora micrófonos de alta sensibilidad para captar el ruido ambiental, y utiliza algoritmos adaptativos de procesamiento digital de señales (LMS, NLMS y RLS) implementados en MATLAB, capaces de generar señales anti-ruido que compensan las interferencias externas. La estructura experimental se complementa con instrumentos físicos para medir variables acústicas clave, incluyendo nivel de presión sonora, frecuencia dominante, distorsión armónica y respuesta en frecuencia, garantizando la validación basada en datos reales y precisos.

Se implementó y simuló el sistema en amplificadores estéreo de alta potencia, considerando tanto el ruido interno del dispositivo (térmico, de disparo, parpadeo y cuántico) como el ruido externo (acústico, electromagnético, de línea y radiofrecuencia). Además, se evaluó la interacción de ambos tipos de ruido para optimizar la cancelación y mantener la fidelidad de la señal de audio.

Los resultados experimentales demostraron que el sistema redujo significativamente el ruido ambiental, mejorando la calidad de la señal reproducida, sin comprometer la integridad del audio. El proyecto destaca la eficacia de la cancelación activa adaptativa (ANC) en entornos urbanos complejos y proporciona un marco práctico para el diseño de soluciones acústicas avanzadas en aplicaciones de audio de alta fidelidad.

Finalmente, esta investigación contribuye a la innovación tecnológica en ingeniería electrónica, ofreciendo un sistema aplicable a entornos reales, adaptable a diferentes condiciones acústicas y con potencial para futuras mejoras en la gestión del ruido urbano y la calidad de audio en equipos profesionales y domésticos.

Palabras claves: Cancelación activa, Ruido urbano, Amplificadores de audio.

ABSTRACT

This research work addresses the development of an adaptive feedback system for urban noise cancellation in high-power audio amplifiers, aimed at improving sound quality in urban environments such as offices and homes in Peru. The project arises from the increasing urban acoustic pollution, which affects health, well-being, and the auditory experience of users.

The designed system incorporates high-sensitivity microphones to capture ambient noise and uses adaptive digital signal processing algorithms (LMS, NLMS, and RLS) implemented in MATLAB, capable of generating anti-noise signals that compensate for external interferences. The experimental setup is complemented with physical instruments to measure key acoustic variables, including sound pressure level, dominant frequency, harmonic distortion, and frequency response, ensuring validation based on real and precise data.

The system was implemented and simulated in high-power stereo amplifiers, considering both internal device noise (thermal, trigger, flicker, and quantum) and external noise (acoustic, electromagnetic, line, and radiofrequency). Additionally, the interaction of both noise types was evaluated to optimize cancellation and maintain audio signal fidelity.

Experimental results demonstrated that the system significantly reduced environmental noise, improving the quality of the reproduced signal without compromising audio integrity. The project highlights the effectiveness of adaptive active noise cancellation (ANC) in complex urban environments and provides a practical framework for designing advanced acoustic solutions in high-fidelity audio applications.

Finally, this research contributes to technological innovation in electronic engineering, offering a system applicable to real environments, adaptable to different acoustic conditions, and with potential for future improvements in urban noise management and audio quality in professional and domestic equipment.

Keywords: Active cancellation, Urban noise, Audio amplifiers.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN 2

1.1. Planteamiento del problema..... 2

1.2. Formulación del problema 3

1.2.1. Pregunta general 3

1.3. Sistematización del problema 4

1.3.1. Preguntas específicas 4

1.4. Objetivos del estudio 4

1.4.1. Objetivo General..... 4

1.4.2. Objetivos Específicos 4

1.5. Hipótesis de investigación 5

1.6. Alcances y Limitaciones 5

1.6.1. Alcances..... 5

1.6.2. Limitaciones..... 5

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO 6

2.1. Antecedentes 6

2.1.1.	Antecedentes Internacionales	6
2.1.2.	Antecedentes nacionales	9
2.2.	Bases teóricas.....	12
2.2.1.	El ruido	12
2.2.2.	Ruido Interno	14
2.2.3.	Ruido Externo	16
2.2.4.	Amplificadores de Audio.....	18
2.2.5.	Principios de la Cancelación Activa de Ruido (ANC)	27
2.2.6.	Algoritmos Adaptativos en Control de Ruido	29
CAPITULO III. METODOLOGÍA Y DESARROLLO		34
3.1.	ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	34
3.1.1.	Estrategia	34
3.1.2.	Tipo de investigación.....	34
3.1.3.	Nivel de investigación	35
3.1.4.	Métodos	35
3.2.	CAMPO DE VERIFICACIÓN.....	36
3.2.1.	Ubicación Espacial	36
3.2.2.	Ubicación Temporal	36
3.2.3.	Unidades de estudio	37
3.3.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....	37
3.3.1.	Técnicas	37

3.3.2.	Instrumentos.....	38
3.4.	ASPECTOS GENERALES DE INSTRUMENTOS UTILIZADOS	39
3.4.1.	Análisis de equipos de medición	39
3.4.2.	Tipos de instrumentos de medición	40
3.4.3.	Tabla resumen de instrumentos	41
3.4.4.	Especificaciones técnicas de los componentes del sistema	42
3.5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	50
3.5.1.	Introducción del problema	50
3.5.2.	Diagrama de Bloques del procedimiento	50
3.5.3.	Toma de datos	50
3.5.4.	Análisis de datos	51
3.5.5.	Modelamiento matemático de filtro adaptativo	52
3.5.6.	Implementación de los algoritmos adaptativos en Matlab.....	53
3.5.7.	Amplificador audio estéreo de alta potencia.....	54
CAPITULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS		57
CAPITULO V: PRESUPUESTO.....		69
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		70
5.1.	Conclusiones.....	70
5.2.	Recomendaciones	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Instrumentos	41
Tabla 2 Micrófono de referencia BOYA BY-BM6060	43
Tabla 3 Micrófono de error BOYA BY-BM6060L	43
Tabla 4 Amplificador AIYIMA A07 Premium.....	44
Tabla 5 Fuente de alimentación conmutada del amplificador.....	45
Tabla 6 Parlante pasivo Victor SP-P7	46
Tabla 7 Sonómetro Benetech GM1356.....	46
Tabla 8 Multímetro digital ANENG SZ06.....	47
Tabla 9 Computadora y software MATLAB	47
Tabla 10 Tabla consolidada de componentes.....	48
Tabla 11 Toma de datos	51
Tabla 12 Análisis de datos	52
Tabla 13 Niveles de ruido reportados en estudios de Arequipa y rangos asumidos en la simulación	59
Tabla 14 Resultados de reducción de ruido (simulados).....	64
Tabla 15 Variables que afectan el desempeño	68
Tabla 16 Lista de componentes y costos.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

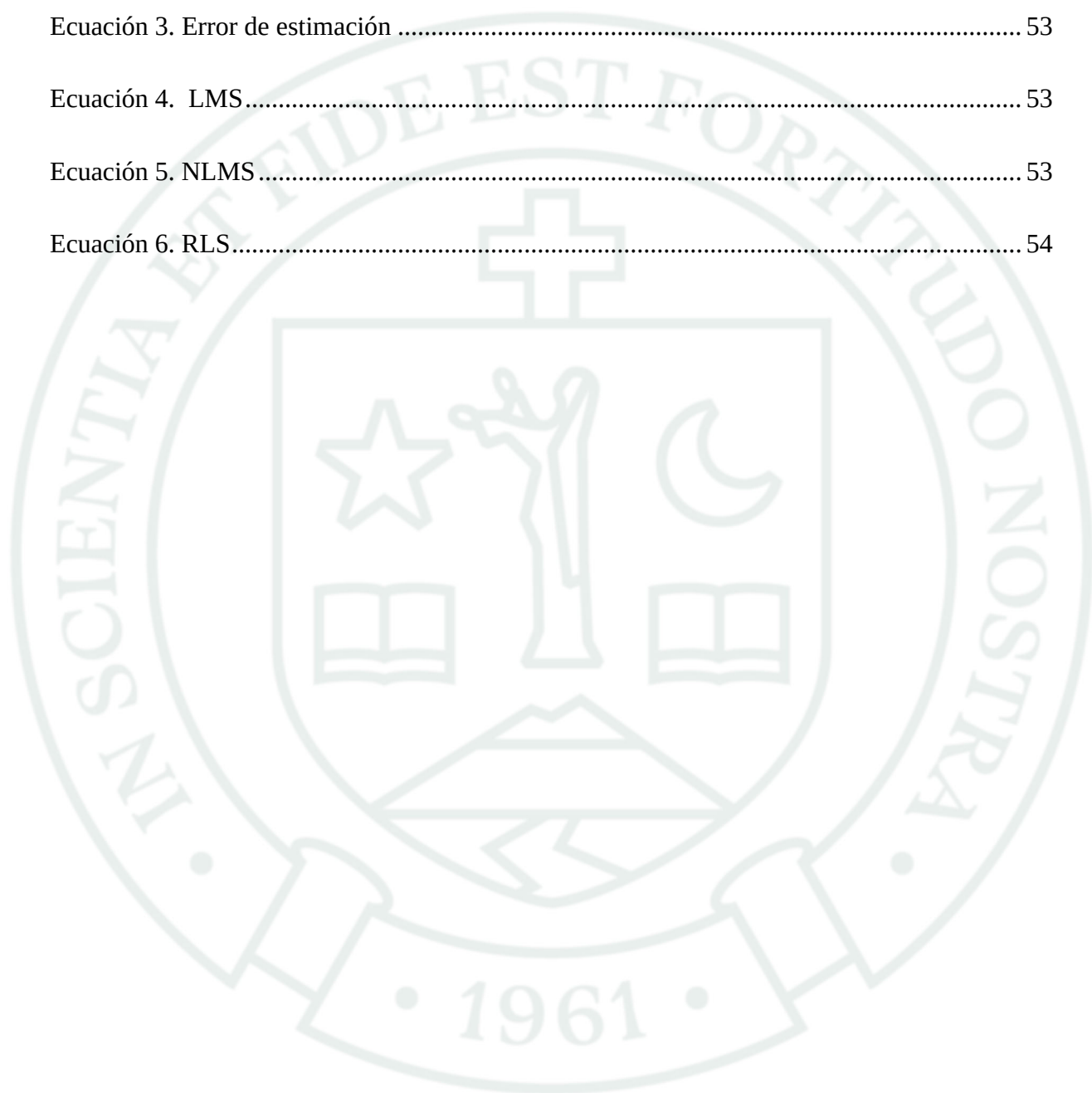
Figura 1 Componentes DALY o AVAD	14
Figura 2 Componentes básicos de un ANC	33
Figura 3 Esquema de armado del sistema	42
Figura 4 Arquitectura de conexión de un prototipo experimental futuro.....	49
Figura 5 Montaje experimental	49
Figura 6 Diagrama de Bloques.....	50
Figura 7 Diagrama funcional por etapa.....	55
Figura 8 Sonómetro Benetech GM1356.....	57
Figura 9 Funcionamiento del sonómetro Benetech GH-1356.....	58
Figura 10 Rangos simulados	60
Figura 11 Amplificador clase D modelo A07	61
Figura 12 Multímetro digital	61
Figura 13 Comprobaciones de continuidad.....	62
Figura 14 Parlante en buen funcionamiento.....	62
Figura 15 Compatibilidad eléctrica y funcional entre amplificador y parlante.....	63
Figura 16 Código modular en MATLAB.....	64
Figura 17 Código modular directa de algoritmos.....	64
Figura 18 Gráfica comparativa.....	65
Figura 19 Procesamiento de grabaciones y generación de archivos filtrados.....	66
Figura 20 Preparación del sonómetro para medición de campo.	67

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Cable usado para la conexión del micrófono con el preamplificador	75
Anexo 2. Amplificación de la señal de micrófono y conexión a la PC.....	75
Anexo 3. Micrófonos.....	76
Anexo 4. Amplificador clase D.....	76
Anexo 5. Parlantes.....	77
Anexo 6. Alimentación del amplificador	77
Anexo 7. Conexión del amplificador al parlante.....	78
Anexo 8. Sonómetro.....	78
Anexo 9. Multímetro	78
Anexo 10. Explicación del código	80

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Modelamiento matemático de filtro adaptativo.....	52
Ecuación 2. Filtro Adaptativo	52
Ecuación 3. Error de estimación	53
Ecuación 4. LMS.....	53
Ecuación 5. NLMS.....	53
Ecuación 6. RLS.....	54



INTRODUCCIÓN

El ruido urbano se ha convertido en un problema importante en los hogares y lugares de trabajo, especialmente en las ciudades, donde el ruido de los vehículos, la maquinaria y las personas afecta la calidad de vida y la experiencia auditiva. En este contexto, lograr un sonido claro y sin distorsiones en los sistemas de audio es un obstáculo técnico importante.

En este proyecto se describe el diseño de un sistema adaptativo para la supresión activa de ruido urbano en amplificadores de audio de alta potencia. El sistema utilizó micrófonos de alta sensibilidad para captar el ruido ambiental y las señales de referencia. El procesamiento se realiza en una PC o computadora portátil que ejecute MATLAB para ejecutar algoritmos adaptativos, específicamente LMS, RLS y NLMS, en las señales capturadas. Estos algoritmos son conocidos por su capacidad de adaptarse a los cambios del entorno y generar señales anti-ruido que, cuando se agregan a una señal de audio, pueden eliminar eficazmente el ruido no deseado.

El sistema se desarrolla y valida utilizando instrumentos físicos para medir variables acústicas y electrónicas, incluido el nivel de presión sonora, la frecuencia dominante, la distorsión armónica y la respuesta de frecuencia del sistema. Las mediciones caracterizan el ruido urbano y el comportamiento del sistema en diferentes escenarios, garantizando que el diseño se base en datos precisos y confiables.

Se garantiza un rendimiento óptimo incorporando modernas tecnologías de hardware y software al diseño. El amplificador seleccionado tiene una potencia de salida de más de 50 W por canal. Canal que puede reducir el ruido externo manteniendo la calidad del sonido. El sistema también se valida mediante pruebas experimentales en entornos reales controlados, como oficinas y hogares, para evaluar su eficacia en condiciones del mundo real.

Esta investigación puede ayudar a desarrollar soluciones más efectivas para controlar el ruido ambiental y mejorar la calidad del sonido en entornos cotidianos.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La contaminación acústica urbana es un problema grave que afecta a la salud pública y a la calidad de vida de los residentes. La exposición constante al ruido ambiental puede provocar trastornos del sueño, estrés, enfermedades cardiovasculares y deterioro cognitivo (Delegación de Bizkaia, 2019). Varios estudios han encontrado un vínculo entre el ruido urbano y un mayor riesgo de hipertensión arterial y otros problemas de salud cardiovascular (Consejo Nacional de Prevención del Ruido, 2020).

En los sistemas de audio, el ruido ambiental puede afectar gravemente la calidad del sonido y degradar la experiencia auditiva del usuario. Se ha demostrado que la tecnología de cancelación activa de ruido (ANC) en dispositivos de audio es eficaz para reducir esta interferencia de audio; ANC utiliza micrófonos para capturar el ruido externo y crear una señal de cancelación opuesta, reduciendo así la percepción del ruido (Sony, 2022).

Sin embargo, la implementación de sistemas de reducción activa de ruido en amplificadores de audio de alta potencia, especialmente en entornos urbanos como oficinas y hogares, plantea desafíos únicos; la variabilidad y complejidad del ruido urbano requieren sistemas adaptativos que puedan adaptarse dinámicamente a las condiciones ambientales cambiantes. Además, estos sistemas deben mantener la integridad y fidelidad del audio original para evitar distorsiones o pérdida de calidad. Por lo tanto, es necesario desarrollar soluciones innovadoras para integrar la tecnología de reducción activa de ruido en amplificadores de audio de alta potencia diseñados para entornos urbanos. Estas soluciones deben ser capaces de medir y analizar variables acústicas ambientales en tiempo real utilizando instrumentos físicos precisos, y aplicar algoritmos adaptativos para lograr una reducción efectiva del ruido sin comprometer la calidad del sonido.

Abordar esta cuestión mejora significativamente la experiencia auditiva de los usuarios en entornos urbanos, reduce el impacto negativo del ruido ambiental en la salud y el bienestar para sentar un precedente para futuras investigaciones.

El nivel de contaminación acústica en las ciudades del Perú ha aumentado significativamente debido al crecimiento urbano descontrolado, el incremento del parque vehicular, los proyectos de construcción y el comercio informal. Según información del Ministerio del Ambiente (MINAM), los niveles de ruido en zonas residenciales y comerciales de las ciudades de Lima, Arequipa y Trujillo continúan superando los límites permitidos, afectando negativamente la salud y calidad de vida de los pobladores (MINAM, 2019). En los hogares y oficinas de estas áreas urbanas, las personas a menudo están expuestas a ruidos como bocinas, motores de automóviles y actividades comerciales al aire libre debido a la falta de insonorización adecuada. Esta situación no sólo afecta la tranquilidad y la eficiencia laboral de las personas, sino que también crea desafíos técnicos para los sistemas de audio que buscan ofrecer una alta reproducción de sonido en entornos ruidosos. El ruido de la ciudad puede degradar la experiencia auditiva, especialmente de los equipos de audio de alto rendimiento diseñados para ofrecer una calidad de sonido superior.

El objetivo es desarrollar un sistema innovador para mejorar la calidad del sonido en entornos urbanos del Perú reduciendo el impacto del ruido ambiental. Este sistema de retroalimentación activa y adaptativa para la reducción del ruido urbano utilizó micrófonos de alta precisión para capturar y analizar el ruido ambiental en tiempo real. Además, se deben implementar algoritmos adaptativos avanzados como LMS, RLS y NLMS para generar señales de cancelación efectivas para garantizar un rendimiento dinámico estable ante cambios ambientales y luego integrarlos con amplificadores de audio de alta potencia (más de 50 W por canal). Actualmente se está realizando una validación experimental en escenarios reales, como casas adosadas y oficinas en Perú, para probar su eficacia en la reducción del ruido ambiental. La solución no sólo mejora la experiencia auditiva, sino que también ayuda a reducir el impacto negativo del ruido urbano en la salud y el bienestar y ayuda a crear espacios urbanos más atractivos y confortables.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. *Pregunta general*

¿Cómo diseñar un sistema de retroalimentación adaptativa para la reducción de ruido urbano en un amplificador de audio de alta potencia que garantice su funcionalidad en diversos entornos urbanos como oficinas y hogares?

1.3. Sistematización del problema

1.3.1. Preguntas específicas

- ¿Cuáles son las principales características acústicas del ruido urbano presente en oficinas y hogares peruanos que deben considerarse para el diseño de un sistema adaptativo de cancelación de ruido?
- ¿Qué características técnicas debe cumplir un amplificador de audio estéreo de alta potencia para ser compatible con un sistema de cancelación activa de ruido basado en retroalimentación adaptativa?
- ¿Qué algoritmo adaptativo implementado en MATLAB presenta mayor eficiencia para la cancelación activa del ruido urbano en un sistema de audio de alta potencia?
- ¿En qué medida el sistema de retroalimentación adaptativa diseñada mejora la reducción del ruido urbano y mantiene la calidad del audio en pruebas realizadas en entornos reales?

1.4. Objetivos del estudio

1.4.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de retroalimentación adaptativa para la reducción de ruido urbano en un amplificador de audio de alta potencia para garantizar su funcionalidad en diversos entornos urbanos, como oficinas y hogares.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar las principales características del ruido urbano en oficinas y hogares peruanos para establecer los requerimientos técnicos del sistema.
- Seleccionar un amplificador de audio estéreo de alta potencia y evaluar su compatibilidad con el sistema de cancelación de ruido.
- Diseñar e implementar algoritmos adaptativos en MATLAB para la cancelación activa del ruido urbano, seleccionando el más eficiente.
- Validar el desempeño del sistema en entornos reales mediante pruebas experimentales, midiendo su eficacia y su impacto en la calidad del audio.

1.5. Hipótesis de investigación

El diseño de un sistema de retroalimentación adaptativa basado en algoritmos de cancelación activa de ruido permitirá reducir significativamente el ruido urbano en un amplificador de audio de alta potencia, mejorando su desempeño y adaptabilidad en diferentes entornos urbanos como oficinas y hogares.

1.6. Alcances y Limitaciones

1.6.1. Alcances

El alcance del proyecto cubre el diseño e implementación de un sistema adaptativo para la supresión activa de ruido urbano en un amplificador de audio estéreo de alta potencia. Se utilizó algoritmos adaptativos desarrollados en MATLAB, como LMS, RLS y NLMS. Seleccionaremos y evaluaremos componentes clave, como amplificadores comerciales y micrófonos de alta fidelidad, para garantizar que se integren eficazmente en el sistema. Además, el rendimiento del sistema se verificó mediante pruebas experimentales en entornos controlados y escenarios del mundo real, como oficinas y hogares. Se utilizó instrumentos físicos para medir variables acústicas importantes, como la atenuación del ruido y la calidad del sonido, para demostrar su funcionalidad en condiciones urbanas típicas peruanas.

1.6.2. Limitaciones

El sistema está diseñado para enfocarse en analizar y reducir las frecuencias de ruido urbano más comunes encontradas en oficinas y hogares en Perú, sin considerar otras fuentes de ruido menos comunes. El desarrollo se centró en la creación de prototipos funcionales, sin planes de producción comercial o integración con hardware integrado, mediante la realización de pruebas experimentales en un número limitado de escenarios seleccionados, centrándose en condiciones específicas de ruido urbano y sin intentar cubrir todos los entornos urbanos posibles del país. Además, las primeras implementaciones se realizaron en computadoras de escritorio y no están optimizadas para computadoras portátiles o dispositivos especiales; finalmente, el análisis se limitó al comportamiento acústico en un entorno determinado y no consideró factores como la durabilidad o los costos de implementación para su uso a gran escala.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. *Antecedentes Internacionales*

Macario Chib (2019), AMPLIFICADOR EN CLASE D PARA APLICACIONES DE AUDIO. Este trabajo tiene como objetivo la simulación e implementación de un amplificador de potencia en clase D para aplicaciones en sistemas de audio. Para ello, se observa la realización de estudios en el funcionamiento teórico de las etapas que lo conforman y cómo se relacionan entre ellas. Tras comprender su funcionamiento, se observa el diseño teórico de cada una de las etapas del sistema. Para demostrar el correcto funcionamiento del sistema, realizó la simulación del diseño teórico utilizando el software PSIM. Una vez obtenidas las simulaciones, se montó un prototipo en una placa de pruebas y se realizó su implementación.

Este trabajo nos aporta conocimientos sobre amplificadores de audio y su simulación en software. Este conocimiento nos brindó herramientas al momento de desarrollar la simulación por software del sistema de retroalimentación adaptativa para la cancelación de ruido urbano en amplificadores de audio.

Pérez Zapata (2013) CONTROL ACTIVO DE RUIDO EN CONDUCTOS DE VENTILACION. Este trabajo nos muestra una investigación sobre la contaminación acústica, que es un problema ambiental crítico, especialmente en entornos urbanos donde también coexiste con la contaminación del aire. La revolución industrial, aunque mejoró la calidad de vida, aumentó los niveles de ruido asociados con actividades industriales, lo que puede afectar negativamente la salud. En respuesta a estos desafíos, se observa el desarrollo e implementación de sistemas de Control Activo de Ruido (CAR) en conductos de ventilación. Este proyecto se centra en analizar el impacto del ruido en entornos sensibles como hospitales y en desarrollar métodos para controlar el ruido en estos contextos críticos. La investigación busca adaptar el CAR a estos entornos específicos para mejorar la calidad acústica y reducir la contaminación sonora.

Este estudio sobre el Control Activo de Ruido en conductos de ventilación es relevante para la investigación en cancelación de ruido urbano con retroalimentación adaptativa en amplificadores de audio, ya que proporciona un marco para la implementación de tecnologías de control de ruido que podrían aplicarse para mejorar la calidad del audio en entornos urbanos afectados por la contaminación acústica.

Patiño (2007) CONTROL ACTIVO PARA EL AISLAMIENTO DE RUIDO PRODUCIDO POR EL MOTOR DE LOS CARROS AL INTERIOR DE ESTOS. Este trabajo de investigación se centra en el desarrollo de una técnica de aislamiento del ruido producido por los motores de automóviles mediante la implementación de un sistema de "control activo de ruido". Se observa que la técnica utilizada es la interferencia destructiva o cancelación de fase para reducir el nivel sonoro, especialmente en entornos urbanos como la ciudad de Bogotá, donde el ruido de los motores de vehículos y la congestión pueden causar molestias significativas, como dolores de cabeza y una experiencia auditiva desagradable. Además, observamos la cauterización del ruido del motor, que se encuentra principalmente en las bajas frecuencias, no se controla eficazmente con materiales absorbentes comunes que son más efectivos para frecuencias medias y altas.

Por esta razón, este trabajo optó por el control activo de ruido como solución adecuada para el aislamiento de bajas frecuencias en vehículos. Esta técnica ofrece una solución efectiva para reducir el ruido del motor sin comprometer el espacio interior del automóvil.

Este proyecto es relevante para la investigación sobre la cancelación de ruido urbano con retroalimentación adaptativa en amplificadores de audio, ya que ilustra la aplicación exitosa del control activo de ruido en un entorno específico. El enfoque en la reducción del ruido de bajas frecuencias en vehículos proporciona un paralelo importante para la implementación de técnicas similares en amplificadores de audio, donde el objetivo es mejorar la calidad del sonido en ambientes urbanos con alta contaminación acústica. La experiencia y soluciones desarrolladas en este contexto pueden ser adaptadas para abordar problemas acústicos similares en sistemas de audio.

Wilm (2018) ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE CANCELACIÓN ACTIVA DE RUIDO UTILIZANDO UN SISTEMA MICROCONTROLADO. Este trabajo presenta el estudio y desarrollo de un sistema de control activo de ruido acústico implementado en un sistema microcontrolado de bajo costo. Se busca entender la teoría del control activo de ruido y superar las dificultades de su implementación práctica. Para ello, se utilizaron herramientas de simulación y desarrollo para programar los algoritmos LMS y FxLMS en el sistema microcontrolado. Las señales sonoras fueron captadas mediante micrófonos con tecnología MEMS, y sus respuestas en frecuencia se ajustaron mediante circuitos de preprocesamiento formados por amplificadores y filtros analógicos, montados en placas de circuito impreso. Se construyó una carcasa protectora para el equipo utilizando impresión 3D y corte láser. También

se diseñó un sistema acústico con tubos, altavoces y micrófonos, comúnmente utilizado en pruebas de cancelación activa de ruido. Los ensayos realizados tenían como objetivo reducir la amplitud de señales senoidales propagadas dentro de este sistema acústico. Los resultados obtenidos en escenarios simulados y prácticos mostraron diferencias significativas y proporcionan pautas para futuros proyectos con el mismo enfoque.

Este estudio es relevante para la investigación sobre la cancelación de ruido urbano con retroalimentación adaptativa en amplificadores de audio, ya que ofrece una perspectiva práctica sobre la implementación de sistemas de control activo de ruido utilizando tecnologías de bajo costo y microcontroladores. La experiencia en la captura de señales acústicas, el procesamiento con algoritmos avanzados y la construcción de sistemas acústicos específicos para pruebas puede ser aplicada para mejorar los amplificadores de audio en entornos urbanos. Las metodologías y tecnologías exploradas en este proyecto proporcionan conocimientos y técnicas valiosas que pueden adaptarse para enfrentar desafíos similares en la reducción de la contaminación sonora en sistemas de audio.

Anshuman (2013) ACTIVE NOISE CONTROL: BASIC UNDERSTANDING. Este artículo trata sobre el problema creciente del ruido producido por equipos industriales y su impacto en la comodidad auditiva. Tradicionalmente, se han utilizado métodos pasivos, como barreras mecánicas, para atenuar el ruido no deseado. Aunque estos métodos son efectivos en un amplio rango de frecuencias, son costosos, voluminosos y menos eficaces en frecuencias bajas.

En años recientes, el Control Activo de Ruido (ANC) ha ganado popularidad como una solución para reducir el ruido fuerte e indeseado. Basado en los principios fundamentales de superposición y cancelación de ondas, el ANC ha demostrado ser efectivo, con un costo y mantenimiento más bajos. Un altavoz de cancelación puede colocarse junto a la fuente del sonido para ser atenuado, mientras que un transductor que produce la señal de cancelación puede ubicarse en el lugar donde se requiere la atenuación. Sin embargo, esta técnica es más eficiente para un solo usuario y presenta desafíos en espacios grandes debido a la interferencia constructiva y destructiva de las ondas sonoras.

En espacios pequeños y cerrados, como el compartimento de un automóvil, la cancelación global puede lograrse mediante múltiples altavoces y micrófonos de retroalimentación, así como la medición de las respuestas modales del espacio.

Este enfoque es relevante para la investigación sobre la cancelación de ruido urbano con retroalimentación adaptativa en amplificadores de audio, ya que ilustra la aplicación del Control Activo de Ruido en entornos industriales y su capacidad para abordar problemas complejos de interferencia sonora. La adaptación de estas técnicas para mejorar la calidad del audio en ambientes urbanos ruidosos puede beneficiarse de la experiencia y métodos utilizados en el ANC, especialmente en la gestión de espacios cerrados y la cancelación personalizada.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Cosme (2017), en su tesis titulada "Atenuación acústica de Cristales de Sonido para reducción del nivel de ruido en condiciones controladas" tuvo como objetivo principal investigar la eficacia de los Cristales de Sonido como una tecnología alternativa para la atenuación acústica en ambientes controlados. La metodología empleada en este estudio se basó en la construcción de cristales de sonido utilizando materiales seleccionados específicamente para cumplir con las condiciones experimentales requeridas, y en la medición del ruido con un sonómetro siguiendo protocolos establecidos por el Ministerio del Ambiente (Minam) de Perú. Las pruebas de medición del ruido se realizaron antes y después de la instalación de los cristales, permitiendo evaluar su capacidad para reducir el nivel de ruido a través de los fenómenos de dispersión múltiple, absorción y resonancia. Los resultados obtenidos mostraron una disminución significativa en el nivel de ruido, con una atenuación que varió entre 9 y 10 dBA, lo que confirmó la efectividad de los Cristales de Sonido como una solución viable para la reducción del ruido en las condiciones estudiadas. Esta investigación concluye que los Cristales de Sonido pueden ser utilizados eficazmente como barreras acústicas entre un emisor y un receptor, ofreciendo una alternativa innovadora y sostenible en el control de la contaminación acústica, y abre la posibilidad de su aplicación en diferentes contextos donde la reducción del ruido es crucial para mejorar la calidad de vida y el bienestar en entornos urbanos y laborales. Además, este trabajo destaca la importancia de continuar explorando y perfeccionando estas tecnologías, para optimizar su diseño y maximizar su rendimiento en una variedad de escenarios, adaptándose a las necesidades específicas de cada ambiente.

Seminario (2012), en su tesis titulada "Diseño de un sistema de perifoneo en caso de emergencia para un edificio de mediana altura" tuvo como objetivo desarrollar un sistema eficiente de comunicación que permitiera transmitir mensajes claros y precisos durante situaciones de emergencia en el edificio A McGregor de la Pontificia Universidad Católica del

Perú. Para alcanzar este objetivo, la metodología incluyó un análisis detallado de los sistemas de notificación existentes y su limitación en cuanto a la comunicación efectiva en emergencias. Se diseñó un sistema de perifoneo que incluyó la selección y distribución adecuada de parlantes y amplificadores, tomando en cuenta parámetros acústicos fundamentales como la presión sonora, el tiempo de reverberación, y la inteligibilidad de las señales de audio. Además, se consideraron los costos de adquisición e instalación de los equipos, asegurando que el sistema fuera económicamente viable sin comprometer la calidad del servicio. Los resultados demostraron que el sistema propuesto cumplió con los requerimientos iniciales, logrando una distribución uniforme del sonido en todo el edificio, lo que garantizó que los mensajes de emergencia fueran percibidos de manera clara y efectiva por todos los ocupantes, sin causar pánico ni confusión. Este sistema no solo mejoró la seguridad en el edificio, sino que también proporcionó un modelo replicable para otros edificios de mediana altura, donde la comunicación efectiva en emergencias es crucial para la seguridad de los ocupantes. Además, la investigación subrayó la importancia de considerar aspectos como la uniformidad de cobertura y la selección de mensajes pregrabados o en vivo, según la naturaleza de la emergencia, lo cual se reflejó en la capacidad del sistema para tranquilizar a los ocupantes durante situaciones críticas y dirigir sus acciones de manera ordenada y controlada, minimizando el riesgo de accidentes derivados del pánico. Esta implementación es un claro ejemplo de cómo la tecnología puede ser adaptada para mejorar la seguridad en entornos urbanos, considerando tanto la infraestructura existente como los requerimientos específicos de cada edificación.

Bravo (2020), en su tesis titulada "Estudio del diseño de un amplificador CMOS basado en un par diferencial complementario para adquisición de señales neuronales" tuvo como objetivo diseñar un amplificador de instrumentación CMOS de 180 nm enfocado en la adquisición de señales neuronales, las cuales presentan magnitudes en el rango de microvoltios a decenas de milivoltios y frecuencias de hasta 10 kHz. Para lograr este objetivo, la metodología incluyó el desarrollo de un modelo de solución utilizando una topología fully differential de dos etapas, que se caracteriza por su robustez frente al ruido de modo común. Se implementó además una etapa AC-coupled para reducir el offset del electrodo, con un enfoque en minimizar el ruido referido a la entrada y el consumo de potencia, criterios esenciales para los sistemas de adquisición de biopotenciales. La tecnología empleada fue TSMC 180 nm, seleccionada por su capacidad para integrar circuitos de alta densidad con un consumo energético reducido. Los

resultados del estudio demostraron que el diseño propuesto alcanzó una ganancia de 40 dB, con un ruido referido a la entrada inferior a 5 μ VRMS, cumpliendo así con los estrictos requisitos de sensibilidad necesarios para la correcta adquisición de señales neuronales. Además, el diseño logró mantener un bajo consumo de potencia, con una disipación de menos de 7 μ W, lo que lo hace adecuado para su implementación en dispositivos médicos implantables. Esta investigación concluye que el diseño de un amplificador CMOS utilizando un par diferencial complementario no solo es viable, sino que ofrece un rendimiento óptimo para la adquisición precisa de señales neuronales, posicionándose como una herramienta crucial en el desarrollo de interfaces neuronales implantables y otras aplicaciones biomédicas que requieren un procesamiento altamente fiable de señales biológicas.

Morán (2009), en su tesis titulada "Diseño de un procesador de efectos de sonido en un FPGA" se propuso desarrollar un sistema de procesamiento digital de efectos de sonido para su aplicación en estudios de grabación y conciertos, con el fin de proporcionar a los músicos y técnicos de sonido una herramienta versátil y eficiente que permitiera la modificación del sonido en tiempo real. El objetivo principal de este estudio fue diseñar un sistema capaz de implementar varios efectos sonoros comunes, como el delay, delay cruzado, flanger y reverberación, aprovechando la tecnología FPGA (Field Programmable Gate Array). La metodología empleada incluyó un análisis profundo del estado del arte sobre los sistemas de procesamiento de sonido y las tecnologías relacionadas, seguido de la simulación e implementación de los algoritmos en el entorno Matlab/Simulink, utilizando el bloque System Generator para DSP de Xilinx. El sistema fue diseñado y probado en la tarjeta de desarrollo Virtex-II Pro, donde se implementaron los algoritmos de efectos en bloques de Simulink que luego fueron trasladados al FPGA. Los resultados obtenidos fueron evaluados tanto analíticamente como subjetivamente, destacándose la efectividad del algoritmo de delay cruzado, que alcanzó una aprobación del 90% por parte de los músicos que participaron en las pruebas, debido a su capacidad para producir un efecto balanceante entre los canales de audio estéreo. Asimismo, los efectos de flanger y reverberación lograron simular con gran precisión los entornos acústicos deseados, confirmando que la implementación en FPGA es una alternativa viable y eficiente a los métodos tradicionales basados en tecnología analógica. Esta investigación concluye que el desarrollo de procesadores de efectos de sonido en FPGA no solo es factible, sino que ofrece ventajas significativas en términos de compactación, flexibilidad y

mejora del rendimiento, posicionándose como una opción robusta para aplicaciones profesionales en la industria del audio.

Herrera (1975), en su trabajo titulado "Realimentación negativa en amplificadores electrónicos" se propuso investigar y sistematizar los conceptos dispersos acerca de la realimentación negativa en amplificadores electrónicos, específicamente en aquellos diseñados para audiofrecuencia. El objetivo principal fue establecer un método de diseño práctico y eficiente que facilitara la creación de amplificadores de alta fidelidad. Para lograrlo, se realizó un exhaustivo análisis de la literatura existente, reuniendo y simplificando los conocimientos clave sobre la realimentación negativa, que se encuentran diseminados en diversas fuentes. La metodología consistió en un enfoque teórico-práctico, donde se analizaron los principios fundamentales de la realimentación negativa y su impacto en la mejora de la estabilidad, la linealidad y la reducción de la distorsión armónica en los amplificadores. Además, se exploraron diferentes configuraciones de circuitos para optimizar el rendimiento de los amplificadores de audio. Los resultados obtenidos en este estudio permitieron desarrollar un enfoque de diseño que no solo facilita la implementación de amplificadores de alta fidelidad, sino que también asegura un rendimiento superior en términos de calidad de sonido y fiabilidad. Este trabajo concluye que la realimentación negativa es un componente crucial en el diseño de amplificadores electrónicos, y su correcta aplicación puede llevar a significativas mejoras en el rendimiento de los sistemas de audiofrecuencia, consolidando así su relevancia en el campo de la ingeniería electrónica. Además, se destaca la importancia de contar con un enfoque metodológico claro y bien estructurado, que permita a los diseñadores afrontar los desafíos de la creación de amplificadores de alta fidelidad con mayor confianza y eficiencia. Este estudio representa una valiosa contribución al entendimiento y aplicación de la realimentación negativa en la ingeniería de audio, proporcionando una guía práctica y accesible para los profesionales y estudiantes del área.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. *El ruido*

El ruido es una señal no deseada que puede interferir con la reproducción de audio, degradando la calidad del sonido percibido. En términos generales, el ruido es cualquier sonido o perturbación que no es parte del mensaje original y que puede distorsionar la señal que se

desea transmitir o reproducir. En el contexto de los amplificadores de audio, el ruido puede originarse tanto internamente, debido a las imperfecciones y limitaciones de los componentes electrónicos, como externamente, por interferencias provenientes del entorno en el que opera el amplificador. El estudio del ruido en estos sistemas es crucial para el desarrollo de tecnologías que busquen mejorar la calidad del audio, especialmente en entornos urbanos donde la interferencia de ruido externo es significativa.

El ruido ambiental, también denominado ruido residencial o doméstico, abarca las emisiones sonoras generadas por todas las fuentes excepto las industriales. Entre sus principales fuentes destacan:

- Exteriores: Tráfico vehicular, ferroviario y aéreo, así como actividades de construcción y obras públicas.
- Interiores: Sistemas de ventilación, equipos de oficina, electrodomésticos y ruidos provenientes de vecinos.

Los efectos sobre la salud incluyen:

- Interferencia en la comunicación verbal.
- Pérdida auditiva progresiva.
- Alteraciones del sueño.
- Problemas cardiovasculares y psicofisiológicos.
- Reducción del rendimiento cognitivo.
- Molestia subjetiva.
- Impacto en el comportamiento social.

Para medir el impacto integral del ruido ambiental en la salud poblacional, se emplean métricas como los Años de Vida Ajustados por Discapacidad (AVAD/DALYs) y los Años de Vida Ajustados por Calidad (QALYs).

AVAD/DALYs

Su aplicación se ha extendido en evaluaciones de salud pública y análisis de impacto ambiental, integrando tanto la esperanza de vida como la calidad de vida en una sola medida.

Mortalidad prematura: Años de vida potenciales perdidos por muerte temprana.

Discapacidad: Años equivalentes de salud óptima afectados por condiciones patológicas o limitaciones funcionales.

QALYs

Como contrapunto, los QALYs miden la salud desde la perspectiva de la calidad de vida. Un QALY representa un año vivido en plena salud, mientras que estados de salud deficiente se registran como fracciones de este valor. Se utiliza en economía de la salud para evaluar la eficacia de intervenciones médicas.

Figura 1

Componentes DALY o AVAD



Nota. Elaboración propia.

Tipos de Ruido en Amplificadores de Audio

El ruido en los amplificadores de audio se puede clasificar en dos grandes categorías: ruido interno y ruido externo. Ambos tipos de ruido tienen diferentes orígenes y características, y cada uno puede afectar de manera significativa la calidad del sonido reproducido.

2.2.2. Ruido Interno

El ruido interno se genera dentro del propio amplificador debido a los componentes electrónicos utilizados en su construcción. Este tipo de ruido es inevitable en cualquier sistema electrónico, aunque su impacto puede minimizarse mediante un diseño cuidadoso y la selección de componentes de alta calidad.

Ruido Térmico (Johnson o Nyquist): Este ruido es causado por la agitación térmica de los electrones dentro de los componentes electrónicos, especialmente en resistores y otros dispositivos pasivos. A medida que los electrones se mueven de manera aleatoria, generan pequeñas fluctuaciones de voltaje que se traducen en ruido. El ruido térmico es directamente proporcional a la temperatura del componente y a su resistencia. Es un ruido de banda ancha, lo que significa que afecta a todas las frecuencias por igual. Su magnitud puede reducirse enfriando los componentes, pero nunca se puede eliminar por completo.

Ruido de Disparo (Shot Noise): El ruido de disparo se produce debido a la naturaleza discreta de la corriente eléctrica, especialmente en los componentes semiconductores como transistores y diodos. Surge cuando los portadores de carga (electrones o agujeros) atraviesan una barrera de potencial, como la unión PN en un diodo. Este ruido es más prominente a bajas corrientes y es proporcional a la corriente que pasa a través del dispositivo. A diferencia del ruido térmico, el ruido de disparo tiene una distribución uniforme a lo largo de las frecuencias, pero su intensidad depende de la magnitud de la corriente eléctrica.

Ruido de Parpadeo (Flicker Noise o 1/f Noise): El ruido de parpadeo es una forma de ruido que aparece en componentes semiconductores y otros dispositivos activos, como transistores y resistencias. Aunque su origen no está completamente comprendido, se cree que está relacionado con fluctuaciones en la conductividad de los materiales semiconductores y otros procesos estocásticos dentro de los dispositivos. Este ruido es inversamente proporcional a la frecuencia, lo que significa que es más significativo en frecuencias bajas. En aplicaciones de audio, este tipo de ruido puede ser especialmente problemático porque afecta las frecuencias más bajas, que son esenciales para la claridad del sonido.

Ruido Cuántico: En dispositivos electrónicos muy sensibles y a muy bajas temperaturas, el ruido cuántico puede volverse significativo. Este ruido está relacionado con las fluctuaciones cuánticas inherentes al vacío cuántico y a los efectos cuánticos en los dispositivos electrónicos. Este tipo de ruido es extremadamente pequeño en la mayoría de las aplicaciones prácticas, pero puede ser relevante en sistemas de alta precisión como los amplificadores utilizados en equipos científicos y de medición de alta sensibilidad.

2.2.3. Ruido Externo

El ruido externo proviene del entorno en el que opera el amplificador de audio. Este tipo de ruido puede ser electromagnético, acústico o relacionado con la red eléctrica. A diferencia del ruido interno, el ruido externo puede variar significativamente dependiendo del entorno y de la cantidad de fuentes de interferencia presentes. Los principales tipos de ruido externo incluyen:

Interferencia Electromagnética (EMI): La interferencia electromagnética (EMI) se produce cuando señales electromagnéticas no deseadas, generadas por otros dispositivos electrónicos, interfieren con el funcionamiento del amplificador. Estas señales pueden ser emitidas por radios, televisores, motores eléctricos, líneas de alta tensión, teléfonos móviles y otros dispositivos electrónicos. La EMI puede causar ruido audible en los sistemas de audio, como zumbidos o silbidos. También puede provocar distorsiones en la señal de audio, especialmente si las frecuencias de la interferencia coinciden con las bandas de frecuencia de audio. La EMI es más común en entornos urbanos debido a la alta densidad de dispositivos electrónicos y la proximidad de líneas de transmisión de energía.

Ruido Acústico Ambiental: Este ruido proviene del entorno que rodea al amplificador, como el tráfico, las conversaciones humanas, la maquinaria industrial, entre otros. El ruido ambiental puede ingresar al sistema de audio a través de los micrófonos u otros dispositivos de entrada. El ruido acústico se compone de una mezcla de frecuencias y puede ser continuo, como el ruido del tráfico, o intermitente, como el ruido de una construcción cercana. Este tipo de ruido es particularmente problemático en grabaciones y sistemas de sonido en vivo, donde puede ser captado por los micrófonos y amplificado, afectando la claridad del audio.

Interferencia por Línea de Energía: Las fluctuaciones en la calidad del suministro eléctrico, como picos de voltaje, caídas de tensión y ruido de alta frecuencia en la red de energía, pueden introducir ruido en los amplificadores de audio. Este tipo de interferencia es común en áreas con un suministro eléctrico inestable o donde se utilizan muchos dispositivos eléctricos de alta potencia. La interferencia por línea de energía puede manifestarse como zumbidos de baja frecuencia o ruidos de alta frecuencia en el sistema de audio. Los picos de voltaje pueden causar ruidos transitorios, mientras que las caídas de tensión pueden provocar una distorsión

temporal del sonido. Los reguladores de voltaje y los filtros de línea se utilizan a menudo para mitigar este tipo de ruido.

Interferencia por Radiofrecuencia (RFI): La interferencia por radiofrecuencia (RFI) es causada por señales de radio que se introducen en el sistema de audio, especialmente si el amplificador o los cables actúan como antenas. Fuentes comunes de RFI incluyen transmisores de radio, torres de telefonía móvil y otros dispositivos de comunicación. La RFI puede causar ruidos chirriantes, estática o incluso la transmisión de señales de radio en el sistema de audio. Este tipo de interferencia puede ser especialmente difícil de eliminar y suele requerir la implementación de filtros específicos en el diseño del sistema de audio.

Ruido de Tierra (Ground Loop Noise): El ruido de tierra se produce cuando hay una diferencia de potencial entre dos puntos de tierra en un sistema de audio, lo que genera una corriente no deseada en el circuito. Este problema es común en sistemas donde múltiples dispositivos están conectados a diferentes tomas de tierra. El ruido de tierra se manifiesta típicamente como un zumbido constante a 50 o 60 Hz (dependiendo de la frecuencia de la red eléctrica), que puede ser difícil de eliminar. Es una de las formas más comunes de ruido en sistemas de audio y suele requerir un cableado cuidadoso y el uso de transformadores de aislamiento para solucionarlo.

2.2.3.1. Interacción entre el Ruido Interno y Externo

Es importante destacar que, en muchos casos, el ruido interno y el ruido externo pueden interactuar, amplificando los efectos negativos en la calidad del audio. Por ejemplo, un amplificador con un alto nivel de ruido térmico puede ser más susceptible a la interferencia electromagnética, ya que el ruido interno puede amplificar las señales de EMI captadas por el sistema. De manera similar, un entorno con un alto nivel de ruido acústico puede exacerbar los efectos del ruido de parpadeo, ya que ambos tienden a afectar las mismas bandas de frecuencia.

En la práctica, la mitigación efectiva del ruido en los amplificadores de audio requiere una comprensión profunda tanto del ruido interno como del ruido externo, y la implementación de estrategias de diseño que aborden ambos tipos de ruido de manera integral.

2.2.4. Amplificadores de Audio

2.2.4.1. Introducción a los Amplificadores de Audio

Un amplificador de audio es un dispositivo esencial en la cadena de procesamiento de sonido, encargado de aumentar la amplitud de una señal de audio para que pueda ser reproducida con suficiente potencia a través de altavoces o auriculares. Su objetivo principal es amplificar las señales de bajo nivel (como las provenientes de un micrófono, un instrumento musical, o una fuente de audio) sin introducir distorsiones significativas, manteniendo la fidelidad y calidad del sonido original.

Los amplificadores de audio se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde sistemas de sonido domésticos hasta equipos profesionales en estudios de grabación y conciertos en vivo. Su diseño y construcción dependen en gran medida de la aplicación específica, con variaciones en términos de potencia de salida, distorsión permitida, y eficiencia. El principio fundamental detrás del funcionamiento de un amplificador de audio es la amplificación de señales eléctricas de baja potencia sin alterar su forma de onda, es decir, sin distorsionar la información contenida en la señal original. Esto se logra mediante el uso de dispositivos activos como transistores o tubos de vacío, que controlan el flujo de corriente en el circuito en respuesta a la señal de entrada.

2.2.4.2. Componentes Básicos

Los amplificadores de audio están compuestos por varias etapas y componentes clave, cada uno con una función específica:

Transistores: Los transistores son dispositivos semiconductores que pueden actuar como interruptores o amplificadores. En los amplificadores de audio, los transistores controlan la corriente que pasa a través del circuito en respuesta a la señal de entrada, permitiendo la amplificación. Son preferidos en la mayoría de los amplificadores modernos debido a su pequeño tamaño, alta eficiencia, y bajo costo.

Tubos de Vacío: Aunque son menos comunes en los amplificadores modernos, los tubos de vacío son apreciados en algunos amplificadores de audio de alta gama, especialmente en el

ámbito de la música, debido a su capacidad para producir un sonido "cálido" y rico en armónicos. Funcionan controlando el flujo de electrones en un vacío, lo que permite la amplificación de la señal.

Etapas de Entrada: La etapa de entrada es donde se recibe la señal de audio original. En esta etapa, la señal puede ser preamplificada para aumentar su nivel antes de ser enviada a las etapas de ganancia y salida. Los preamplificadores también pueden incluir filtros de paso alto o bajo, ecualizadores, y otras configuraciones que ajustan la tonalidad de la señal.

Etapas de Ganancia (Driver Stage): La etapa de ganancia es crucial, ya que es donde la señal de audio experimenta la mayor amplificación. Aquí, los transistores o tubos de vacío se utilizan para incrementar la señal de entrada a niveles que pueden ser utilizados para alimentar un altavoz. La calidad de esta etapa afecta directamente la fidelidad del sonido, ya que cualquier distorsión introducida en esta etapa será amplificada en las etapas siguientes.

Etapas de Salida: La etapa de salida es responsable de entregar la señal amplificada al altavoz o dispositivo de salida. Esta etapa debe manejar altas corrientes y voltajes, y generalmente está diseñada para minimizar la distorsión y maximizar la eficiencia energética. Puede incluir transformadores de salida para adaptar la impedancia entre el amplificador y los altavoces.

Fuente de Alimentación: La fuente de alimentación convierte la corriente alterna de la red eléctrica en corriente continua necesaria para operar los circuitos del amplificador. Una fuente de alimentación estable es crucial para garantizar que el amplificador funcione de manera consistente y sin introducir ruido adicional en la señal de audio.

2.2.4.3. Clasificación de los Amplificadores

Los amplificadores de audio se pueden clasificar según varios criterios, que incluyen la clase de operación, la configuración del circuito, y la aplicación específica. Estas clasificaciones ayudan a determinar la eficiencia, la fidelidad, y la idoneidad de un amplificador para una tarea determinada.

Por Clase de Operación:

Clase A: Los amplificadores de clase A son conocidos por su excelente linealidad y baja distorsión, lo que los convierte en una opción preferida para aplicaciones de alta fidelidad. Sin embargo, son inherentemente ineficientes porque el dispositivo de amplificación (transistor o tubo) está siempre en conducción, lo que significa que consumen energía incluso en ausencia de una señal de entrada. Esto resulta en una alta disipación de calor y un bajo rendimiento energético.

Clase B: Los amplificadores de clase B operan de manera más eficiente que los de clase A porque los dispositivos de amplificación sólo conducen durante la mitad del ciclo de la señal de audio. Esto significa que un transistor se encarga de la mitad positiva del ciclo y otro de la mitad negativa. Sin embargo, este diseño introduce distorsión de cruce en la señal de audio, que es más notable en señales de bajo nivel.

Clase AB: La clase AB combina aspectos de las clases A y B para lograr un equilibrio entre fidelidad y eficiencia. En este diseño, los transistores están ligeramente polarizados para reducir la distorsión de cruce, pero no permanecen en conducción completa como en la clase A. Esto mejora la eficiencia en comparación con la clase A, mientras que mantiene una baja distorsión.

Clase D: Los amplificadores de clase D son conocidos por su alta eficiencia, que puede superar el 90%. En lugar de operar en modo lineal, los transistores en un amplificador de clase D funcionan en modo de conmutación, alternando rápidamente entre los estados de encendido y apagado. La señal de audio se modula mediante modulación por ancho de pulso (PWM), lo que permite una alta eficiencia con una fidelidad aceptable. Debido a su alta eficiencia, estos amplificadores generan menos calor y son comunes en aplicaciones portátiles y en equipos donde la eficiencia energética es crucial.

Por Configuración de Circuito:

Amplificadores Lineales: Los amplificadores lineales proporcionan una amplificación continua y proporcional de la señal de entrada. Mantienen la forma de onda de la señal de audio

sin distorsionarla, lo que los hace ideales para aplicaciones donde la fidelidad del sonido es crítica, como en sistemas de sonido de alta fidelidad y equipos de grabación.

Amplificadores de Potencia: Diseñados para entregar altos niveles de potencia a los altavoces, los amplificadores de potencia son esenciales en sistemas de sonido que requieren volúmenes altos, como en conciertos o instalaciones de sonido en grandes auditorios. Estos amplificadores deben manejar corrientes y voltajes elevados sin distorsionar la señal de audio.

Preamplificadores: Los preamplificadores se utilizan para aumentar el nivel de señales de bajo nivel antes de enviarlas a un amplificador de potencia. Estos dispositivos son esenciales en situaciones donde la señal de entrada es muy débil, como en micrófonos o pastillas de guitarra, y donde es necesario un primer nivel de amplificación con bajo ruido.

Por Aplicación:

Amplificadores de Instrumentos Musicales: Estos amplificadores están diseñados específicamente para resaltar ciertas características de las señales de instrumentos, como guitarras eléctricas o teclados. Suelen incluir controles para ajustar el tono, la distorsión, y otros efectos. Algunos amplificadores de instrumentos están diseñados para proporcionar una distorsión agradable y armónica, lo que contribuye al "carácter" del sonido del instrumento.

Amplificadores para Sistemas de Sonido: Utilizados en entornos domésticos o profesionales, estos amplificadores están diseñados para reproducir señales de audio de alta calidad a través de altavoces. Incluyen amplificadores de alta fidelidad (Hi-Fi) que ofrecen una reproducción precisa del sonido, y amplificadores de cine en casa que están optimizados para sistemas de sonido envolvente.

Amplificadores de Auriculares: Especialmente diseñados para proporcionar suficiente potencia y calidad de audio a auriculares de alta impedancia, estos amplificadores aseguran que la señal de audio sea clara y potente incluso cuando se utilizan auriculares que requieren mayor potencia para funcionar adecuadamente.

Parámetros de los Amplificadores de Audio

Para evaluar y comparar el rendimiento de los amplificadores de audio, es fundamental considerar varios parámetros técnicos que influyen directamente en la calidad del sonido y la eficiencia del dispositivo.

Potencia de Salida (Wattage): La potencia de salida, medida en vatios (W), es un indicador de la cantidad de energía que un amplificador puede entregar a un altavoz. Los amplificadores con mayor potencia de salida pueden producir volúmenes más altos sin distorsionar el sonido. Sin embargo, una mayor potencia de salida no siempre es sinónimo de mejor calidad de sonido; es importante que la potencia esté bien gestionada para evitar daños en los altavoces o distorsiones indeseadas.

Distorsión Armónica Total (THD): La distorsión armónica total mide la cantidad de distorsión que el amplificador introduce en la señal de audio. Se expresa como un porcentaje y representa las variaciones en la forma de onda de salida en comparación con la señal original. Un THD bajo es deseable porque indica que el amplificador está reproduciendo la señal de audio de manera más fiel, sin agregar distorsiones que podrían degradar la calidad del sonido.

Relación Señal/Ruido (SNR): La relación señal/ruido es una medida de la cantidad de ruido (sonidos indeseados) que se mezcla con la señal de audio. Se expresa en decibelios (dB) y un valor más alto indica que la señal de audio es más fuerte en comparación con el ruido de fondo. Un SNR alto es crucial para asegurar que la señal de audio sea clara y libre de interferencias.

Impedancia de Entrada y Salida: La impedancia de entrada y salida afecta cómo el amplificador interactúa con otros componentes en la cadena de señal, como fuentes de audio y altavoces. La impedancia de entrada debe ser alta para evitar cargar la fuente de señal, mientras que la impedancia de salida debe estar bien emparejada con la impedancia del altavoz para maximizar la transferencia de potencia y minimizar la pérdida de señal.

Ancho de Banda: El ancho de banda de un amplificador se refiere al rango de frecuencias que puede amplificar eficazmente sin atenuación significativa. Un ancho de banda amplio asegura que todas las frecuencias del espectro audible (20 Hz - 20 kHz) sean

reproducidas con precisión. Esto es especialmente importante en aplicaciones de alta fidelidad donde se requiere una reproducción precisa de todos los detalles del sonido.

Eficiencia: La eficiencia de un amplificador se refiere a la proporción de la potencia de entrada que se convierte en potencia de salida útil. Los amplificadores de clase A son menos eficientes porque disipan mucha energía en forma de calor, mientras que los amplificadores de clase D son altamente eficientes porque minimizan la pérdida de energía al operar en modo de conmutación. La eficiencia es un factor clave en el diseño de amplificadores, especialmente en aplicaciones portátiles o donde la gestión del calor es una preocupación.

Simulación de Amplificadores de Audio en Software

La simulación de amplificadores de audio en software es una herramienta invaluable para los ingenieros de diseño. Permite probar y optimizar circuitos antes de construirlos físicamente, lo que ahorra tiempo y recursos. Uno de los softwares más utilizados para la simulación de amplificadores es MATLAB, junto con herramientas especializadas como Simulink.

MATLAB y Simulink:

MATLAB es un entorno de cálculo numérico y un lenguaje de programación que permite la simulación de circuitos de amplificación y el análisis de señales de audio. Con MATLAB, los diseñadores pueden modelar el comportamiento de los amplificadores, analizar su respuesta en frecuencia, y optimizar parámetros como la ganancia, la distorsión, y la relación señal/ruido.

Simulink, un entorno gráfico de simulación integrado en MATLAB, permite la creación de modelos de amplificadores a través de bloques de construcción. Los usuarios pueden simular el comportamiento de los componentes individuales del amplificador, como transistores y condensadores, y observar cómo estos interactúan en un circuito completo. Esto es particularmente útil para analizar cómo diferentes configuraciones afectan la calidad del sonido y la eficiencia del amplificador.

Con MATLAB y Simulink, es posible implementar y probar algoritmos de procesamiento digital de señales (DSP) que mejoran el rendimiento del amplificador, como filtros activos, ecualizadores paramétricos, y técnicas de cancelación de ruido. Además, se pueden realizar análisis de estabilidad, evaluar la respuesta transitoria, y simular condiciones extremas para garantizar que el diseño final sea robusto y fiable.

2.2.4.4. Amplificadores de Válvulas

Las válvulas fueron los principales dispositivos electrónicos activos desde principios del siglo XX hasta mediados de la década de 1960. Posteriormente, fueron desplazadas por transistores y diodos de estado sólido, los cuales cumplían las mismas funciones en dispositivos más compactos, con menor peso y temperaturas de operación más bajas. En el ámbito musical, esto representó una ventaja en términos de potencia y portabilidad. Para la década de 1970, la amplificación mediante transistores comenzó a consolidarse, dando paso a la producción masiva de amplificadores basados en esta tecnología.

Sin embargo, desde el inicio se evidenció un problema con los transistores: su rendimiento lineal teórico generaba sonidos menos cálidos y con menor carácter en circuitos de audio, algo que no ocurría con las válvulas. Por esta razón, las válvulas han seguido utilizándose en amplificadores para instrumentos musicales y equipos de audio profesional, como estudios de grabación y sistemas de alta fidelidad. Aunque su comportamiento es menos lineal e imperfecto en términos teóricos, el sonido resultante es más musical y atractivo en cuanto a tonalidad. Un circuito simple con una válvula puede proporcionar un carácter distintivo y una coloración sonora difícil de replicar incluso con circuitos digitales avanzados.

Funcionamiento de una Válvula

Para operar correctamente, las válvulas requieren temperaturas superiores a los 100 °C, alcanzando en algunos casos hasta 300 °C. El filamento es el componente encargado de generar el calor necesario para su funcionamiento.

Existen cuatro tipos de válvulas comúnmente utilizadas en audio, diferenciadas por el número de elementos internos, sin considerar el filamento:

- Diodos

- Triodos
- Tétrodos
- Pentodos

Todas estas configuraciones incluyen dos componentes esenciales: ánodo y cátodo. El cátodo, ubicado en torno al filamento, emite electrones que se desplazan hacia el ánodo, generando una corriente eléctrica. Para que este proceso ocurra de manera eficiente, es necesario mantener un vacío en el interior de la válvula. Además, se requieren tensiones elevadas, entre 300 y 600 voltios, para garantizar que los electrones sean atraídos adecuadamente por el ánodo.

En las configuraciones de triodos, tétrodos y pentodos, se incorporan elementos adicionales que permiten regular el flujo de electrones entre el cátodo y el ánodo, estableciendo así el principio de amplificación.

Algunas de las características más relevantes de las válvulas incluyen:

Ganancia relativamente baja.

Alta impedancia de entrada.

Baja capacidad de entrada.

Resistencia a sobrecargas momentáneas.

Saturación progresiva y recuperación rápida ante sobrecargas.

Sensibilidad a vibraciones, lo que puede generar ruido microfónico.

2.2.4.5. Amplificadores de Transistores

Los amplificadores que no utilizan válvulas se denominan amplificadores de estado sólido, ya que no dependen de dispositivos con gas o líquido en su interior. El uso de transistores en amplificación se debe, en parte, a que las válvulas pueden resultar costosas para equipos de alta potencia, dado que la mayoría de los amplificadores de válvulas generan menos de 50 vatios por canal.

Los primeros amplificadores de transistores no superaban en calidad a los mejores amplificadores de válvulas de la época. Debido a sus bajas capacitancias internas, los

amplificadores de válvulas presentan una linealidad en la respuesta de entrada, lo que los hace compatibles con fuentes de alta impedancia, como otros circuitos de válvulas o controles de volumen de impedancia elevada. En contraste, los amplificadores de transistores pueden presentar mayor acoplamiento entre la entrada y la salida, así como una impedancia de entrada inferior. Sin embargo, estos problemas han sido mitigados con el tiempo mediante diversas técnicas de diseño, incluyendo el uso de transistores JFET en las etapas de entrada.

Funcionamiento y Características de los Transistores

Los transistores operan a partir de la inyección de portadores minoritarios desde el emisor hacia la base, generando un flujo de corriente hacia el colector, lo que permite regular la corriente de la base. Los transistores bipolares (BJTs) pueden encontrarse en pares combinados o integrados en circuitos complejos junto con resistencias y condensadores para optimizar su rendimiento.

Al igual que en el caso de las válvulas, existen diversas clases de transistores, cada una con características particulares. Algunos poseen una alta ganancia de corriente, mientras que otros presentan una menor ganancia. Existen transistores diseñados para operar a alta velocidad, así como otros más lentos. También varían en términos de capacidad de manejo de corriente y niveles de ruido.

En términos generales, los transistores presentan las siguientes características:

Alta estabilidad.

- Larga vida útil.
- Elevada ganancia.
- Necesidad de una corriente de entrada.
- Baja resistencia de entrada.
- Capacidad de manejar altas entradas.
- Saturación rápida.
- Recuperación lenta tras una sobrecarga.

- Susceptibilidad a problemas térmicos si no se emplean correctamente.

Además de los transistores bipolares (BJTs), en el diseño de amplificadores se utilizan MOSFETs y JFETs. Los MOSFETs, al igual que los BJTs, pueden encontrarse en pares y en circuitos integrados. Aunque los MOSFETs emparejados no alcanzan la precisión de los BJTs, ofrecen un mejor acoplamiento que las válvulas. Presentan baja corriente y capacidad de entrada, moderada ganancia, saturación controlada y una recuperación rápida. Son dispositivos estables y resistentes, sin problemas de sobrecalentamiento o avalancha térmica. Sin embargo, no toleran condiciones extremas tan bien como las válvulas.

Por su parte, los JFETs funcionan de manera similar a los MOSFETs, pero sin puerta aislada. Comparten muchas características con estos últimos, incluyendo disponibilidad en pares y en tipos P y N. A diferencia de los MOSFETs, los JFETs no suelen usarse como dispositivos de potencia, pero son excelentes para preamplificación de bajo ruido. Debido a la unión en la puerta, presentan una mayor capacidad de entrada y no pueden operar en modos de acumulación o enriquecimiento.

2.2.5. Principios de la Cancelación Activa de Ruido (ANC)

La Cancelación Activa de Ruido (ANC) es una técnica de control de ruido que utiliza ondas sonoras para reducir o eliminar el sonido no deseado en un ambiente. Este método se basa en el principio de interferencia destructiva, que se logra generando una onda acústica con la misma amplitud, pero en fase opuesta (desfasada 180 grados) a la onda de ruido que se desea cancelar. Cuando ambas ondas se combinan, se produce una cancelación parcial o total del ruido.

Principios Fundamentales:

Interferencia Destructiva: La base de la ANC es crear una onda sonora de fase opuesta a la del ruido. Al combinar ambas ondas, se reducen las amplitudes del sonido y se disminuye el ruido percibido.

- **Sensores y Generadores:** Los sistemas ANC utilizan micrófonos para captar el ruido ambiental y altavoces para emitir la onda de cancelación. La precisión en la captura y la reproducción es crucial para la efectividad del sistema.
- **Eficiencia en Frecuencias Bajas:** ANC es particularmente eficaz para cancelar ruidos de baja frecuencia, como el zumbido de motores o el tráfico.
- **Reducción Activa:** A diferencia de los métodos pasivos, como el aislamiento acústico, que dependen de materiales absorbentes, la ANC puede adaptarse dinámicamente a cambios en el entorno de ruido.
- **Limitaciones en Frecuencias Altas:** La efectividad de ANC disminuye con el aumento de la frecuencia del ruido, ya que la cancelación requiere una sincronización precisa que es más difícil de lograr a frecuencias altas.
- **Complejidad y Costo:** Los sistemas ANC pueden ser complejos de diseñar e implementar, requiriendo hardware especializado y algoritmos avanzados.

Componentes del Sistema ANC

Micrófono de Referencia: Captura el sonido ambiental y convierte las ondas acústicas en señales eléctricas que pueden ser procesadas. Los micrófonos pueden ser de diferentes tipos, como de condensador o dinámico, cada uno con sus propias características de sensibilidad y respuesta en frecuencia. La colocación del micrófono es crucial. En auriculares, el micrófono suele estar cerca de la oreja para captar el ruido más relevante. En vehículos, puede estar ubicado cerca del motor o en el habitáculo.

Procesador de Señal: El procesador recibe la señal del micrófono de referencia y la analiza para determinar las características del ruido (frecuencia, amplitud, etc.). Calcula una señal de cancelación con fase opuesta a la del ruido. Este cálculo debe ser extremadamente rápido para ser efectivo en tiempo real. Los algoritmos pueden ser simples o complejos, dependiendo de las necesidades. Los sistemas adaptativos utilizan algoritmos que ajustan la señal de cancelación en función de las variaciones en el ruido ambiental.

Altavoces Canceladores: Emiten la onda canceladora que interfiere con el ruido ambiental. Estos altavoces deben ser capaces de reproducir el sonido con precisión y a una

frecuencia que permita una cancelación efectiva. Los altavoces en sistemas de Cancelación Activa de Ruido (ANC) están diseñados para trabajar en conjunto con los micrófonos y el procesador. Deben ser capaces de producir ondas en el rango de frecuencias relevantes para la cancelación.

Micrófonos de Retroalimentación: Capturan el sonido después de que la onda canceladora ha sido emitida. Permiten al sistema ajustar la señal de cancelación en tiempo real para mantener su eficacia. La retroalimentación permite que el sistema se adapte a cambios en el entorno acústico o en la señal de ruido.

Funcionamiento de la compensación de sonido

Este sistema opera mediante un mecanismo diferenciado para cada canal de audio (izquierdo y derecho). Su diseño se basa en un enfoque predictivo que genera señales inversas para neutralizar las interferencias acústicas.

Mecanismo de acción

La tecnología utiliza micrófonos dedicados a la cancelación de ruido, que detectan las variaciones sonoras y las presiones atmosféricas. Estos elementos procesan la información en tiempo real, adaptando la respuesta según las características específicas de cada canal.

Características clave

Procesamiento diferenciado: Cada canal recibe una señal de compensación adaptada a sus condiciones acústicas.

Adaptabilidad dinámica: La respuesta se modifica según la naturaleza del ruido ambiental y su interacción con los micrófonos.

Resultados personalizados: La salida final refleja un equilibrio único para cada lado, logrado mediante cálculos en tiempo real.

2.2.6. Algoritmos Adaptativos en Control de Ruido

Algoritmo Least Mean Squares (LMS)

El algoritmo Least Mean Squares (LMS) es uno de los algoritmos adaptativos más utilizados en sistemas de Cancelación Activa de Ruido (ANC) debido a su simplicidad y efectividad. Este algoritmo se emplea para ajustar los coeficientes de un filtro adaptativo con el fin de minimizar el error entre una señal deseada y la señal filtrada. En el contexto de ANC, el LMS se utiliza para generar la señal de cancelación que contrarresta el ruido ambiental.

Ventajas del Algoritmo LMS:

- **Simplicidad Computacional:** El LMS es un algoritmo relativamente simple en términos de cálculo, lo que lo hace adecuado para implementaciones en tiempo real.
- **Adaptación Continua:** El LMS puede adaptarse dinámicamente a cambios en el ruido ambiental, lo que lo convierte en una opción ideal para entornos donde el ruido varía con el tiempo.

Desventajas del Algoritmo LMS:

- **Sensibilidad al Tamaño del Paso:** El rendimiento del LMS depende críticamente del tamaño del paso, que debe ser cuidadosamente seleccionado para equilibrar la convergencia y la estabilidad.
- **Convergencia Lenta en Entornos Ruidosos:** En ambientes con ruido altamente variable o complejo, la convergencia del LMS puede ser lenta, lo que afecta la efectividad de la cancelación de ruido.

Principios del Algoritmo LMS:

Minimización del Error Cuadrático Medio: El LMS busca minimizar la potencia promedio del error entre la señal deseada (el ruido a cancelar) y la señal de salida del filtro adaptativo. Este error se define como la diferencia entre el ruido percibido y la onda de cancelación generada por el sistema.

Actualización Iterativa: El algoritmo LMS ajusta los coeficientes del filtro de manera iterativa. En cada iteración, los coeficientes se modifican en función de la dirección que reduce el error cuadrático medio, utilizando la gradiente de la función de costo respecto a los coeficientes del filtro.

Convergencia: La capacidad del algoritmo LMS para adaptarse a cambios en el ruido depende de la velocidad de convergencia, la cual está influenciada por el tamaño del paso de adaptación (step size). Un tamaño de paso pequeño resulta en una convergencia más lenta pero más precisa, mientras que un tamaño de paso grande puede conducir a una convergencia rápida, pero con mayor riesgo de inestabilidad.

Proceso de Funcionamiento del Algoritmo LMS en ANC:

Captura de la Señal de Ruido: El micrófono de referencia recoge el ruido ambiental, que actúa como la señal de entrada para el filtro adaptativo.

Cálculo del Error: La señal de salida del filtro adaptativo se compara con la señal de ruido percibido, y la diferencia entre ambas se utiliza para calcular el error.

Actualización de Coeficientes: Los coeficientes del filtro adaptativo se ajustan utilizando la siguiente fórmula de actualización:

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x(n).$$

donde $w(n)$ son los coeficientes del filtro en la interacción n , μ es el tamaño de paso, $e(n)$ es el error en la interacción n , y $x(n)$ es la señal de entrada en la interacción n .

Generación de la Señal de Cancelación: Con los coeficientes actualizados, el filtro adaptativo genera una señal que se envía al altavoz de cancelación para producir la interferencia destructiva con el ruido ambiental.

Principios del Algoritmo LMS

El funcionamiento del algoritmo LMS se basa en varios principios matemáticos y conceptuales clave que lo hacen especialmente útil para la cancelación de ruido en tiempo real:

Adaptación: El LMS es un algoritmo adaptativo, lo que significa que se ajusta continuamente en respuesta a las variaciones en el entorno de ruido. Esto es crucial en aplicaciones de ANC, donde el ruido puede cambiar de manera impredecible.

Estabilidad y Convergencia: La estabilidad del LMS depende de la correcta elección del tamaño del paso μ . Para asegurar que el algoritmo converge, μ debe ser lo suficientemente pequeño para que los ajustes en los coeficientes del filtro sean graduales y precisos, evitando grandes oscilaciones que puedan desestabilizar el sistema.

Optimización del Error: El LMS busca minimizar el error cuadrático medio (MSE), que es una medida de la discrepancia entre la señal deseada y la señal de salida del sistema. Este enfoque garantiza que el sistema de ANC sea eficiente en la reducción del ruido.

Implementación en Tiempo Real: Dado que el LMS es computacionalmente ligero, es adecuado para su implementación en tiempo real, lo cual es esencial para aplicaciones prácticas de ANC donde se requiere una respuesta inmediata a las variaciones en el ruido ambiental.

Componentes básicos de un sistema ANC y una idea de su funcionamiento

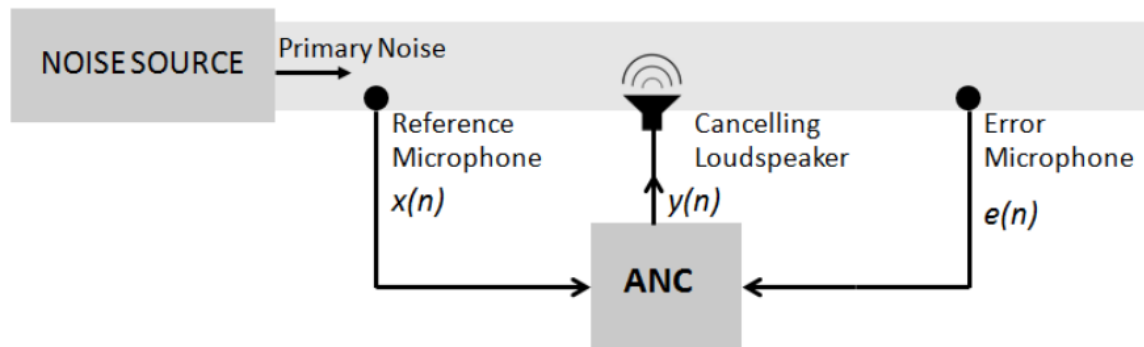
El proceso de cancelación activa de ruido comienza con una fuente de sonido que genera la señal principal de ruido. Esta señal es captada por un micrófono de referencia, al que denominaremos $x(n)$. Dicha señal es enviada al sistema ANC, el cual la analiza y genera una señal de "anti-ruido", que llamaremos $y(n)$, a través de un altavoz diseñado para cancelar el ruido. Posteriormente, el ruido residual que no ha sido eliminado es captado por un micrófono de error, identificado como $e(n)$, y esta información se retroalimenta al sistema ANC para ajustar su funcionamiento. El objetivo principal del sistema es reducir al máximo el valor de $e(n)$.

¿Por qué se utiliza 'n' en lugar del tiempo continuo?

Un detalle importante es que las señales sonoras son funciones del tiempo. Sin embargo, cuando un sensor detecta una señal, esta no se registra como un flujo continuo analógico; en su lugar, se captura en puntos discretos a lo largo del tiempo. Esto se realiza mediante un proceso conocido como frecuencia de muestreo, que indica cuántas veces por segundo el sensor recopila datos. Cuanto mayor sea la frecuencia de muestreo, más precisa será la representación digital de la señal original.

Figura 2

Componentes básicos de un ANC



Nota. Tomada de (Snyder, 2000).

CAPITULO III. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

3.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.1.1. Estrategia

Este proyecto utilizó un estudio de desarrollo con elementos de investigación de simulación, ya que el objetivo principal es crear un sistema funcional (desarrollo) y evaluar su comportamiento mediante simulaciones en MATLAB y pruebas controladas en un entorno real.

Investigación de Desarrollo:

Se centró en el desarrollo de sistemas de retroalimentación adaptativa para la reducción del ruido urbano. Esto incluye el desarrollo e implementación de algoritmos adaptativos, integración de hardware y software y validación experimental del prototipo en condiciones reales.

Investigación de Simulación:

Se utilizó MATLAB como herramienta principal para modelar y simular algoritmos adaptativos (LMS, RLS y NLMS). Estas simulaciones le permiten elegir el algoritmo más eficiente antes de la implementación real.

3.1.2. Tipo de investigación

El presente estudio corresponde a una investigación aplicada y de desarrollo tecnológico, debido a que busca resolver un problema concreto relacionado con la reducción del ruido urbano mediante el diseño, simulación e implementación experimental de un sistema basado en filtros adaptativos (Medina et al., 2023). La investigación no se limita a describir el fenómeno del ruido ambiental, sino que propone una solución técnica orientada a disminuir sus efectos en espacios urbanos como viviendas y oficinas.

Asimismo, presenta características de una investigación de simulación, puesto que se emplea el software MATLAB para modelar, evaluar y comparar algoritmos adaptativos de reducción de ruido, tales como LMS, NLMS y RLS. Esta etapa permite analizar el comportamiento de los algoritmos antes de su validación experimental, facilitando la selección

del método más adecuado en función de su capacidad de reducción sonora, estabilidad y eficiencia computacional.

Por tanto, el estudio se clasifica como aplicado, tecnológico y de simulación, ya que integra el desarrollo de un sistema funcional, el procesamiento digital de señales, la evaluación mediante software especializado y la comprobación experimental básica mediante equipos acústicos y electrónicos.

3.1.3. Nivel de investigación

El nivel de investigación es descriptivo, aplicativo y evaluativo. Es descriptivo porque permite caracterizar el ruido urbano presente en viviendas y oficinas, identificando sus niveles de presión sonora, rangos de frecuencia y comportamiento en diferentes entornos. Esta caracterización es necesaria para establecer los requerimientos técnicos del sistema de reducción de ruido.

Es aplicativo porque el estudio desarrolla una solución tecnológica concreta mediante algoritmos adaptativos implementados en MATLAB y un sistema físico compuesto por micrófono, preamplificador, amplificador, parlante y equipos de medición. La finalidad es aplicar conocimientos de procesamiento digital de señales y electrónica para reducir el ruido urbano en condiciones simuladas y experimentales.

También es evaluativo porque compara el desempeño de los algoritmos LMS, NLMS y RLS, considerando criterios como la reducción de ruido en decibeles, la estabilidad del sistema, la complejidad computacional y la compatibilidad con el montaje experimental. A partir de esta evaluación se determina qué algoritmo presenta mejores condiciones para una futura implementación en tiempo real.

3.1.4. Métodos

En la presente investigación se emplea el método científico, debido a que el estudio parte de la identificación de un problema relacionado con la presencia de ruido urbano, formula una propuesta técnica de solución, realiza simulaciones, ejecuta pruebas experimentales y

analiza los resultados obtenidos para determinar la eficacia del sistema propuesto (Medina et al., 2023).

También se utiliza el método experimental, ya que se desarrolla un montaje básico compuesto por micrófono, preamplificador, computadora, MATLAB, amplificador y parlante, con el propósito de comprobar el flujo de señal y evaluar la reducción de ruido mediante procesamiento offline. Aunque la validación en tiempo real queda limitada por la ausencia de una tarjeta de adquisición de datos compatible, el montaje permite verificar cualitativamente el funcionamiento del sistema.

Asimismo, se aplica el método de simulación, debido a que los algoritmos LMS, NLMS y RLS son implementados y evaluados en MATLAB. La simulación permite modelar el comportamiento del sistema, procesar señales de ruido urbano y comparar la capacidad de reducción de cada algoritmo antes de su aplicación física.

Finalmente, se emplea el método comparativo, porque se contrastan los resultados obtenidos por los diferentes algoritmos adaptativos. Esta comparación permite determinar que el algoritmo RLS alcanza mayor reducción de ruido, mientras que el LMS presenta mejor equilibrio entre desempeño, simplicidad y eficiencia computacional para una implementación inicial (Medina et al., 2023).

3.2. CAMPO DE VERIFICACIÓN

3.2.1. Ubicación Espacial

El proyecto se implementó en un entorno urbano típico del Perú, enfocándose en oficinas y viviendas en zonas con alta densidad poblacional y mucho tráfico vehicular. Se dio prioridad a las zonas urbanas de la ciudad de Arequipa, debido al alto nivel de actividad comercial y de ruido urbano de la región.

3.2.2. Ubicación Temporal

La investigación y el desarrollo del sistema comenzó en el primer trimestre de 2025 y duró 5 meses, abarcando las fases de diseño, simulación, implementación, pruebas experimentales y análisis de resultados.

3.2.3. Unidades de estudio

Universo o Población:

La población esperada incluye viviendas y oficinas ubicadas dentro del área urbana de Arequipa, en zonas donde el tránsito vehicular, así como las actividades comerciales y públicas, generan altos niveles de ruido.

Muestra:

Se seleccionó cinco viviendas y cinco oficinas como muestra representativa. Los espacios se seleccionarán en función de factores como la ubicación geográfica, las características acústicas (niveles de ruido de la ciudad medidos en decibeles) y la voluntad de participar en la prueba.

Procedimientos de Muestreo:

Se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, eligiendo los hogares y oficinas que cumplan con los criterios establecidos y que estén disponibles para colaborar. El objetivo principal es garantizar que los niveles de ruido típicos del entorno urbano sean representativos.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

3.3.1. Técnicas

Análisis del entorno acústico:

Se realizaron análisis acústicos para medir y caracterizar el ruido urbano en entornos reales, como oficinas y viviendas; esto ayuda a identificar frecuencias clave y patrones de ruido que afectan la calidad del sonido. Se utilizó para determinar los parámetros técnicos que deben cumplir los sistemas adaptativos.

Modelado y simulación:

Se utilizó MATLAB para desarrollar y simular algoritmos de reducción activa de ruido como LMS, NLMS y RLS. Mediante la simulación, podemos evaluar el rendimiento de cada

algoritmo y elegir el más eficiente, para probar y verificar la eficacia de los algoritmos antes de implementarlos en hardware.

Pruebas experimentales:

Se realizó pruebas controladas en entornos reales (oficinas y hogares) para evaluar la eficacia del sistema; esto incluyó mediciones del nivel de ruido con y sin el sistema, así como evaluaciones subjetivas de la calidad del sonido.

Análisis comparativo:

Se compararon los resultados obtenidos de diferentes algoritmos adaptativos para seleccionar el algoritmo más efectivo en términos de reducción de ruido y preservación de la calidad del sonido.

3.3.2. Instrumentos

Hardware de medición y procesamiento:

- Micrófonos de medición: Se utilizan micrófonos de condensador o dinámicos con alta sensibilidad para captar el ruido ambiental y los sonidos ambientales.
- Amplificador de audio: Se requiere un amplificador estéreo de alta potencia (>50W por canal) que sea compatible con el sistema de cancelación.
- Tarjeta de adquisición de datos (DAQ): Este dispositivo permite digitalizar las señales analógicas para su procesamiento en MATLAB.
- Altavoces: Se necesitan sistemas de salida de audio de calidad para evaluar el rendimiento del sistema.

Software de simulación y análisis:

- MATLAB: Es la herramienta principal para el diseño y simulación de algoritmos de reducción de ruido adaptativos
- Audacity: Se utiliza para grabar y analizar las señales de ruido captadas durante las pruebas.

- Sistemas de procesamiento en tiempo real: se necesitan computadoras de alto rendimiento para ejecutar los algoritmos utilizados en las pruebas experimentales.

Equipos de medición:

- Sonómetro: Este instrumento mide el nivel de presión sonora (SPL) y cuantifica el ruido ambiental antes y después de la implementación del sistema.
- Analizador de espectros: Es un instrumento que puede determinar las frecuencias dominantes en el entorno, lo cual es esencial para diseñar filtros adaptativos más precisos.
- Osciloscopio: Se utiliza para analizar y visualizar las señales de audio y ruido durante las pruebas.

Materiales adicionales:

- Cables de conexión, adaptadores y soportes para micrófonos y altavoces.
- Un entorno acústicamente adecuado para realizar pruebas controladas, como una sala con aislamiento acústico.

3.4. ASPECTOS GENERALES DE INSTRUMENTOS UTILIZADOS

3.4.1. Análisis de equipos de medición

3.4.1.1. Sonómetro

El sonómetro es un instrumento diseñado para medir el nivel de presión sonora en decibeles (dB), permitiendo cuantificar el ruido ambiental y evaluar su impacto. Para este proyecto se empleó un sonómetro digital Benetech GM1356, con rango de medición de 30 a 130 dB, resolución de 0.1 dB y precisión de ± 1.5 dB. El equipo cumple con la normativa IEC 61672 clase 2, adecuada para estudios de ruido ambiental. Se utilizó con ponderación A (dBA) y tiempo de integración “Fast” para capturar variaciones rápidas del sonido.

3.4.1.2. Micrófono de medición

El micrófono empleado fue un modelo supercardioide BY-BM6060, caracterizado por su alta direccionalidad y respuesta en frecuencia de 60 Hz a 20 kHz. Su sensibilidad es $-36 \text{ dB} \pm 3 \text{ dB}$ y presenta baja distorsión armónica, ideal para mediciones acústicas. Su función principal fue captar el ruido urbano y servir como señal de entrada para el preamplificador y el procesamiento digital posterior. La elección del patrón supercardioide permitió reducir la captación de ruidos laterales no deseados.

3.4.1.3. Multímetro digital

El multímetro digital es un instrumento de propósito general para medir magnitudes eléctricas como **voltaje, corriente y resistencia**. En este proyecto se utilizó para **verificar el correcto funcionamiento de la fuente de alimentación** (32 VDC, 5 A) y comprobar las conexiones eléctricas en el montaje de amplificadores. La unidad empleada tenía precisión de $\pm 0.5\%$ en voltaje DC, rango de 200 mV a 600 V y resolución de 0.1 mV.

3.4.2. Tipos de instrumentos de medición

Según su naturaleza, los instrumentos empleados se clasifican en:

Instrumentos acústicos:

Sonómetro y micrófono, utilizados para la adquisición de señales de ruido ambiental.

Instrumentos eléctricos/electrónicos:

Multímetro, fuente de alimentación y amplificadores, empleados en la verificación y acondicionamiento de la señal.

Instrumentos auxiliares:

Cables XLR, conectores tipo banana, parlantes, adaptadores RCA/TRS y software de adquisición, que permiten la transmisión de la señal y la verificación auditiva de los resultados.

3.4.3. Tabla resumen de instrumentos

Tabla 1

Instrumentos

Instrumento	Marca/Modelo	Rango	Precisión	Función
Sonómetro	Benetech GM1356	30–130 dB	± 1.5 dB	Medición de nivel sonoro ambiental
Micrófono	BY-BM6060 supercardioides	60 Hz – 20 kHz	-36 dB ± 3 dB	Captación de ruido urbano
Multímetro	ANENG SZ06	200 mV – 600 V	$\pm 0.5\%$	Verificación de voltaje, corriente y conexiones

Nota. Elaboración propia.

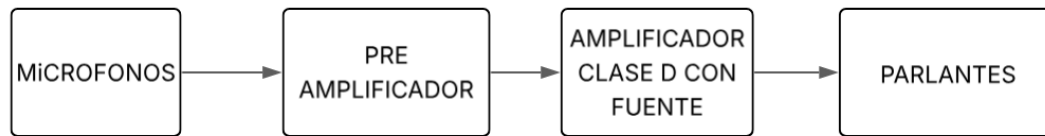
Observación sobre implementación práctica

Dado que no se dispone de una **tarjeta de adquisición** que permita la integración directa entre MATLAB y el sistema físico (micrófono, preamplificador, amplificador y parlante), la **validación del algoritmo** se realizó principalmente a nivel de **simulación en MATLAB**.

No obstante, se construyó un **montaje experimental básico** con los componentes disponibles para comprobar el **flujo de señal** y verificar de manera **cualitativa la reducción de ruido**.

Figura 3

Esquema de armado del sistema



Nota. Elaboración propia.

Notas del experimento:

- Para esta prueba se utilizó **un solo micrófono y un solo parlante**, aunque se dispone de un micrófono y parlante adicionales para futuras pruebas.
- El objetivo principal fue **validar la operación del micrófono y el preamplificador**, así como registrar audio para procesamiento posterior en MATLAB.

3.4.4. Especificaciones técnicas de los componentes del sistema

El sistema experimental propuesto está conformado por dispositivos de captación, adquisición, procesamiento, amplificación, reproducción y medición. La selección de cada componente se realizó considerando su compatibilidad eléctrica, su respuesta en frecuencia, la capacidad de integración con MATLAB, la disponibilidad comercial y la relación entre prestaciones y costo. En las tablas siguientes se distinguen las especificaciones declaradas por el fabricante, las características observadas en el equipo y las condiciones reales de operación previstas para el prototipo.

3.4.4.1. Micrófono de referencia BOYA BY-BM6060

Para captar la señal de referencia del ruido se seleccionó el micrófono BOYA BY-BM6060, de condensador, tipo shotgun y patrón polar supercardioide. Su directividad favorece la captación de la fuente primaria y reduce parcialmente la contribución de sonidos laterales, mejorando la correlación entre la referencia adquirida y el ruido presente en el punto de control.

Tabla 2

Micrófono de referencia BOYA BY-BM6060

Parámetro	Especificación
Marca y modelo	BOYA BY-BM6060
Tipo de transductor	Condensador
Configuración acústica	Shotgun direccional
Patrón polar	Supercardioides
Respuesta en frecuencia declarada	60 Hz a 20 kHz
Sensibilidad declarada	-36 dB $\pm$ 3 dB
Relación señal/ruido declarado	80 dB
Filtro pasa altos	150 Hz, seleccionable
Alimentación	Phantom de 24 a 48 VDC o batería AA de 1,5 V
Conector	XLR balanceado de tres pines
Función en el prototipo	Captación del ruido de referencia

La selección se justifica por su patrón supercardioides, salida balanceada XLR y compatibilidad con alimentación phantom. Estas características reducen la susceptibilidad a interferencias eléctricas en el cableado y facilitan la conexión directa a la interfaz de audio.

3.4.4.2. Micrófono de error BOYA BY-BM6060L

El segundo micrófono seleccionado es el BOYA BY-BM6060L, un micrófono de condensador tipo shotgun con patrón polar supercardioides. En el prototipo se empleó como micrófono de error y se ubicó en el punto donde se desea evaluar la atenuación acústica. Su señal representa el ruido residual resultante de la superposición entre la fuente primaria y la señal de control generada por el sistema.

Tabla 3

Micrófono de error BOYA BY-BM6060L

Parámetro	Especificación
Marca y modelo	BOYA BY-BM6060L
Tipo de transductor	Condensador
Configuración acústica	Shotgun profesional de longitud extendida

Patrón polar	Supercardioide
Respuesta en frecuencia declarada	40 Hz a 20 kHz
Sensibilidad declarada	-32 dB $\pm$ 3 dB (0 dB = 1 V/Pa a 1 kHz)
Relación señal/ruido declarado	80 dB
Impedancia de salida declarada	200 Ω
Filtro pasa altos	150 Hz, seleccionable
Alimentación	Phantom de 24 a 48 VDC o una batería AA de 1,5 V
Conector	XLR balanceado de tres pines
Función en el prototipo	Medición del error acústico residual

El patrón supercardioide y la construcción de longitud extendida del BY-BM6060L favorecen una captación direccional y reducen parcialmente la influencia de fuentes laterales y posteriores. Su salida XLR balanceada y su compatibilidad con alimentación phantom permiten conectarlo directamente a la segunda entrada de la interfaz Behringer UMC202HD.

3.4.4.3. Amplificador AIYIMA A07 Premium

La etapa de potencia está constituida por el amplificador estéreo AIYIMA A07 Premium, basado en el circuito integrado TPA3255 y con topología Clase D. El equipo recibe la señal de control desde las salidas de línea de la interfaz mediante conexión RCA y suministra la potencia necesaria al parlante pasivo.

Tabla 4

Amplificador AIYIMA A07 Premium

Parámetro	Especificación
Marca y modelo	AIYIMA A07 Premium
Clase de operación	Clase D
Circuito integrado de potencia	TPA3255
Amplificadores operacionales	2 $\times$ NE5532, reemplazables
Número de canales	2
Entrada de audio	RCA
Carga compatible declarada	4 a 8 Ω
Alimentación admitida	24 a 48 VDC

Respuesta en frecuencia declarada	20 Hz a 20 kHz
Relación señal/ruido declarado	103 dB
Distorsión declarada	0,05 %
Potencia máxima publicitaria	Hasta 300 W + 300 W a 4 Ω y 10 % THD+N, bajo condiciones específicas de alimentación
Función en el prototipo	Amplificación de la señal de control o antirruido

La ventaja principal frente a un amplificador lineal tradicional Clase AB es su mayor eficiencia energética, menor disipación térmica y tamaño reducido. En un sistema de cancelación activa el amplificador puede operar de forma continua, por lo que la reducción de pérdidas y calentamiento resulta conveniente.

Aclaración sobre la potencia: la cifra de 300 W por canal es una condición máxima publicitaria y no corresponde automáticamente a la potencia disponible en el montaje. La potencia real depende de la tensión y corriente de la fuente, la impedancia del parlante y el límite de distorsión aceptado.

3.4.4.4. Fuente de alimentación conmutada del amplificador

La fuente utilizada en el prototipo fue una fuente conmutada de 32 VDC y 5 A.

Tabla 5

Fuente de alimentación conmutada del amplificador

Parámetro	Especificación
Tipo	Adaptador AC/DC conmutado
Marca de referencia	Fosi Audio o equivalente
Tensión nominal de salida del prototipo	32 VDC
Corriente nominal de salida	5 A
Potencia eléctrica nominal	160 W
Entrada prevista	100–240 VAC, 50/60 Hz, según la placa exacta del adaptador
Polaridad	Centro positivo; verificar físicamente antes de energizar
Función	Alimentación del AIYIMA A07 Premium

La potencia nominal se obtiene mediante $P = V \times I = 32 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 160 \text{ W}$. Este valor representa la potencia eléctrica máxima de la fuente y no la potencia acústica ni la potencia de salida por canal del amplificador.

3.4.4.5. Parlante pasivo Victor SP-P7

El parlante Victor SP-P7 actúa como transductor de control, convirtiendo la señal eléctrica amplificada en la señal acústica utilizada para producir interferencia destructiva en el punto de observación.

Tabla 6

Parlante pasivo Victor SP-P7

Parámetro	Especificación
Marca y modelo	Victor SP-P7
Configuración reportada	Sistema de dos vías, dos altavoces, recinto porteado
Impedancia nominal	6 Ω
Sensibilidad reportada	88 dB
Frecuencia de cruce reportada	1,8 kHz
Dimensiones reportadas	315 × 520 × 290 mm
Masa reportada	13,5 kg
Función en el prototipo	Reproducción de la señal acústica de control

La impedancia de 6 Ω se encuentra dentro del intervalo de carga declarado para el amplificador. Durante las pruebas se incrementó el nivel de salida progresivamente, evitar el recorte de señal y mantener fija la posición del parlante para que las comparaciones sean repetibles.

3.4.4.6. Sonómetro Benetech GM1356

Tabla 7

Sonómetro Benetech GM1356

Parámetro	Especificación
Marca y modelo	Benetech GM1356
Tipo	Sonómetro digital

Rango registrado en la tesis	30 a 130 dB
Precisión nominal registrada	$\pm 1,5$ dB
Variable	Nivel de presión sonora
Función en el prototipo	Comparación del nivel acústico con el control desactivado y activado

Para asegurar comparabilidad, el sonómetro debe permanecer en una posición fija, próximo al micrófono de error, manteniendo constantes la geometría, la señal de ruido primario, el volumen y las condiciones del recinto.

3.4.4.7. Multímetro digital ANENG SZ06

Tabla 8

Multímetro digital ANENG SZ06

Parámetro	Especificación
Marca y modelo	ANENG SZ06
Tipo	Multímetro digital
Variables utilizadas	Tensión continua, resistencia y continuidad
Aplicación	Verificación de la fuente, polaridad, cableado y continuidad
Rangos de medición	voltaje DC 200 mV–600 V ($\pm 1.0\%+5$), voltaje AC 20–600 V ($\pm 1.0\%+5$), corriente DC 20 mA–10 A ($\pm 1.5\%+5$), resistencia 0–20 M Ω ($\pm 1.2\%+5$)
Alimentación	02 baterías AAA
Conteo	2000

3.4.4.8. Computadora y software MATLAB

Tabla 9

Computadora y software MATLAB

Parámetro	Especificación
Plataforma	Computadora personal
Software	MATLAB

Parámetro	Especificación
Herramientas previstas	Audio Toolbox y DSP System Toolbox, según disponibilidad
Frecuencia de muestreo propuesta	48 kHz
Resolución de adquisición	24 bits, limitada por la configuración de la interfaz
Controlador recomendado	ASIO
Modo de procesamiento	Procesamiento continuo por bloques
Función	Adquisición, ejecución del algoritmo adaptativo, generación de la señal de control y registro de resultados

El código original de la tesis, orientado principalmente al procesamiento de vectores y archivos de audio.

3.4.4.9. Tabla consolidada de componentes

Tabla 10

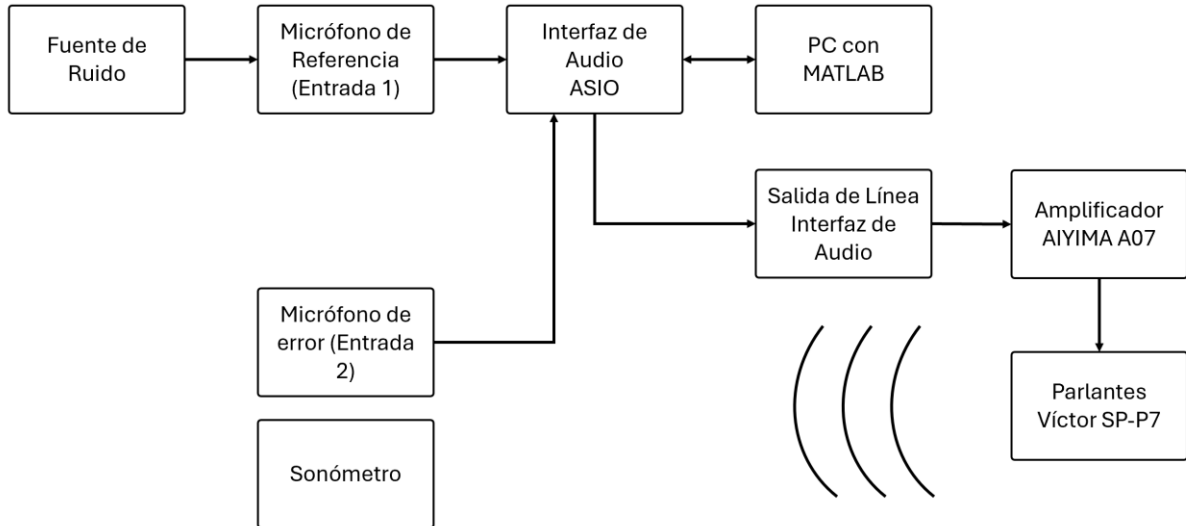
Tabla consolidada de componentes

Componente	Modelo	Características principales	Función
Micrófono de referencia	BOYA BY-BM6060	Condensador, shotgun, supercardioide, XLR	Captar ruido primario
Micrófono de error	BOYA BY-BM6060L	Condensador, shotgun, supercardioide, XLR, 40 Hz–20 kHz	Medir ruido residual
Amplificador	AIYIMA A07 Premium	Clase D, TPA3255, 24–48 VDC, 4–8 Ω	Amplificar antirruído
Fuente	32 VDC / 5 A	160 W nominales	Alimentar amplificador
Parlante	Victor SP-P7	6 Ω , dos vías, recinto sellado	Reproducir señal de control
Sonómetro	Benetech GM1356	30–130 dB, precisión nominal $\pm 1,5$ dB	Medir atenuación
Multímetro	ANENG SZ06	DC 200mV–600V; AC 20–600V; DC 20mA–10A; R 0–20M Ω ; 2000 cuentas	Verificación eléctrica
Procesamiento	PC + MATLAB	48 kHz, ASIO, procesamiento por bloques	Ejecutar algoritmo adaptativo

3.4.4.10. Arquitectura de conexión de un prototipo experimental futuro

Figura 4

Arquitectura de conexión de un prototipo experimental futuro



La demostración experimental futura debe ejecutarse inicialmente con una señal tonal de baja frecuencia y posiciones físicas fijas. Posteriormente se pudo ensayar señales de ruido urbano. El resultado debe documentarse mediante valores RMS, espectro, nivel sonoro antes y después.

Figura 5

Montaje experimental



3.5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.5.1. Introducción del problema

Se va a proceder a describir el procedimiento empleado para la resolución del problema presentado en este caso se detalló el procedimiento realizado para la realización de un filtro adaptativo para la reducción de ruido urbano en un amplificador de alta potencia considerando todos los aspectos evaluados

3.5.2. Diagrama de Bloques del procedimiento

En la figura correspondiente se muestra la secuencia paso a paso que se siguió para el correcto desarrollo del problema indicando los pasos a seguir

Figura 6

Diagrama de Bloques



Nota. Elaboración propia.

3.5.3. Toma de datos

Para la toma de datos se seleccionaron distintas ubicaciones en la ciudad de Arequipa caracterizadas por alta presencia de ruido urbano para iniciar nuestras pruebas. En cada punto de muestreo se efectuó la medición del nivel de presión sonora utilizando un sonómetro, con el fin de obtener las señales de referencia necesarias para el análisis. Estos registros constituyen la base sobre la cual se aplicaron posteriormente los algoritmos adaptativos en MATLAB.

Tabla 11

Toma de datos

Ubicación	Tipo de lugar	Datos adquiridos
Oficina de consultorio ubicada cerca de una avenida concurrida	Zona urbana con alto tránsito vehicular y peatonal	Registro de niveles de presión sonora durante 30 minutos. Se identificó ruido predominante de vehículos, bocinas y flujo continuo de personas.
Oficina doméstica ubicada cerca de una construcción	Zona residencial con interferencia de maquinaria de construcción	Registro de niveles de presión sonora durante 30 minutos. Se identificó ruido de maquinaria pesada, herramientas eléctricas y actividades de construcción.

Nota. Elaboración propia.

Para la recolección de datos se empleó un sonómetro digital junto a su respectivo micrófono, calibrado previamente con un calibrador acústico de referencia (94 dB a 1 kHz), asegurando la confiabilidad de las mediciones. El equipo cumple con la normativa internacional IEC 61672 (clase 1), con una precisión de ± 1 dB y desviación estándar menor al 2%. Asimismo, se emplearon distintos tiempos de integración (fast y slow) para capturar tanto variaciones rápidas como niveles promedios de ruido ambiental esto nos asegura que la toma de datos que tenemos sea bastante precisa y que la desviación de nuestro equipo respecto a nuestros resultados sea lo más cercana posible a los valores reales

3.5.4. Análisis de datos

En este punto se analizó los resultados obtenidos mediante nuestra toma de datos realizando una gráfica analizando las zonas en las que se ha realizados las mediciones de ruido urbano data la cual se usó para la implementación correcta de nuestro algoritmo y posteriormente se realizó una comparación de como mejoraron las condiciones aplicando nuestro filtro adaptativo.

Tabla 12

Análisis de datos

Ubicación	Tipo de lugar	Nivel de ruido
Consultorio cercano a avenida principal	Zona urbana con alto tránsito vehicular y peatonal	Nivel promedio de ruido entre 70 dB y 85 dB durante 30 minutos de medición.
Oficina doméstica cercana a obra de construcción	Zona residencial con presencia de maquinaria de construcción	Nivel promedio de ruido entre 75 dB y 90 dB durante 30 minutos de medición.

Nota. Elaboración propia.

3.5.5. Modelamiento matemático de filtro adaptativo

El sistema que usaremos para la reducción de ruido urbano fue el siguiente:

Primero presentaremos el sistema como un sistema de entradas y salidas

Ecuación 1. Modelamiento matemático de filtro adaptativo

$$d(n) = s(n) + r(n)$$

donde:

$d(n)$: señal medida (señal + ruido)

$s(n)$: señal deseada (audio limpio)

$r(n)$: ruido urbano no deseado

El sistema recibe además una señal de referencia del ruido, $x(n)$, obtenida del entorno

El objetivo del filtro adaptativo es estimar $s(n)$ a partir de $d(n)$ y $x(n)$

Filtro Adaptativo

Un filtro adaptativo de orden M (número de coeficientes) puede representarse como:

Ecuación 2. Filtro Adaptativo

$$y(n) = W^T(n)x(n)$$

donde:

$y(n)$: salida del filtro

$w(n)$: vector de coeficientes del filtro adaptativo

$x(n)$: vector de entradas

El error de estimación es:

Ecuación 3. Error de estimación

$$e(n) = d(n) - y(n)$$

El objetivo es ajustar $w(n)$ para minimizar $e^2(n)$

3.5.6. Implementación de los algoritmos adaptativos en Matlab

El algoritmo empleado para la trata de nuestras señales fueron LMS, NLMS y RLS cada uno fue implementado en MATLAB siguiendo sus respectivas expresiones matemáticas

LMS: Es el algoritmo más utilizado para la eliminación de armónicos en diversas aplicaciones es el más común de aplicar para el proceso de eliminación de ruido su fórmula matemática es la siguiente:

Ecuación 4. LMS

$$w(n+1) = w(n) + \mu x(n)e(n)$$

donde:

μ : paso de adaptación ($0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$, con $\lambda_{\max}$ el mayor autovalor de la matriz de correlación de $x(n)$)

NLMS: El filtro NLS es un filtro mejorado del LMS en este filtro la longitud, así como la potencia de la señal afectaran la estabilidad, convergencia y comportamiento de la señal su fórmula es la siguiente:

Ecuación 5. NLMS

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu}{\epsilon + \|x(n)\|^2} x(n)e(n) \quad (5)$$

donde:

ϵ : pequeña constante para evitar división entre cero.

RLS: Es un tipo de algoritmo con el cual se puede obtener el mínimo cuadrado de la señal de error en forma recursiva esta dado por la siguiente formula:

Ecuación 6. RLS

$$w(n+1) = w(n) + k(n)e(n) \quad (6)$$

$$k(n) = \frac{P(n-1)x(n)}{\lambda + x^T(n)P(n-1)x(n)} \quad (7)$$

$$e(n) = d(n) - W^T(n-1)X(n) \quad (8)$$

$$P(n) = \frac{1}{\lambda} [P(n-1) - k(n)x^T(n)P(n-1)] \quad (9)$$

donde:

λ : factor de olvido ($0 < \lambda \leq 1$)

$k(n)$: es la ganancia de Kalman

$w(n)$: vector de coeficientes del filtro

$P(n)$: matriz inversa de correlación

$e(n)$: error instantáneo

$x(n)$: vector de entrada.

$d(n)$: señal deseada.

El modelado de filtro adaptativo, incluyendo las ecuaciones de salida, error y actualización de coeficientes, se fundamenta en la teoría clásica de filtros adaptativos, más concretamente en Adaptive Filter Theory de Haykin (2013).

3.5.7. Amplificador audio estéreo de alta potencia

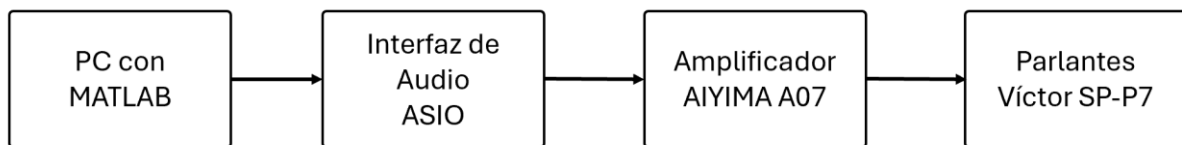
Para la etapa de potencia del sistema se seleccionó el amplificador estéreo AIYIMA A07 Premium, basado en el circuito integrado TPA3255 y con topología de funcionamiento Clase D. Su función dentro del prototipo experimental a futura implementación es aumentar el nivel de potencia de la señal de control generada en MATLAB, de manera que pueda accionar el parlante encargado de reproducir la señal acústica de cancelación o antirruido.

La señal procesada en la computadora es convertida nuevamente de formato digital a analógico mediante la interfaz de audio. Posteriormente, una de las salidas de línea de la interfaz se conecta a la entrada RCA del amplificador. La salida amplificada es suministrada al parlante pasivo Victor SP-P7, el cual transforma la señal eléctrica de control en una onda acústica.

La secuencia funcional de esta etapa es:

Figura 7

Diagrama funcional por etapa



El amplificador seleccionado admite una alimentación comprendida entre 24 y 48 VDC y cargas nominales entre 4 y 8 Ω . Estas condiciones permiten su utilización con el parlante Victor SP-P7, cuya impedancia nominal reportada es de 6 Ω , encontrándose dentro del intervalo de carga previsto para la etapa de potencia.

Justificación de la selección:

- **Alta eficiencia energética:** Al tratarse de un amplificador Clase D, presenta menores pérdidas y disipación térmica que una etapa lineal tradicional, condición conveniente para operación continua.
- **Capacidad de potencia:** Dispone de margen suficiente para accionar el parlante del prototipo y reproducir la señal de control a un nivel acústico útil.
- **Baja distorsión:** La baja distorsión declarada favorece la reproducción de la forma de onda calculada por el algoritmo adaptativo sin modificaciones significativas.
- **Rango de frecuencia:** Su respuesta declarada de 20 Hz a 20 kHz cubre la banda audible y las componentes de baja frecuencia de especial interés para cancelación activa.
- **Compatibilidad eléctrica:** El intervalo de carga declarado de 4 a 8 Ω incluye la impedancia nominal de 6 Ω del Victor SP-P7.
- **Tamaño y disipación:** La topología Clase D permite una implementación compacta y con menor generación de calor.

- **Relación costo-prestaciones:** Proporciona las prestaciones necesarias para la demostración experimental sin recurrir a una etapa profesional de mayor costo.



CAPITULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados en función de los objetivos específicos planteados, verificando su cumplimiento parcial o total según corresponda.

Objetivo específico 1

Identificar las principales características del ruido urbano en oficinas y hogares peruanos para establecer los requerimientos técnicos del sistema.

Acciones realizadas

- Se dispuso de un micrófono supercardioide BY-BM6060 y un sonómetro Benetech GM1356 como instrumentos principales para la adquisición y caracterización del ruido.

Figura 8

Sonómetro Benetech GM1356



Nota. Elaboración propia.

- Se verificó el correcto funcionamiento del sonómetro (bench test) y quedó disponible para mediciones cuantitativas futuras en campo.

Figura 9

Funcionamiento del sonómetro Benetech GH-1356



Nota. Elaboración propia.

- La caracterización del ruido urbano se realizó mediante revisión bibliográfica y simulaciones basadas en grabaciones de referencia para 10 locaciones (5 viviendas y 5 oficinas).

Resultados de la caracterización del ruido

La caracterización se abordó desde dos enfoques complementarios:

Revisión bibliográfica:

Diversos estudios han reportado que los niveles de ruido en áreas residenciales de Arequipa se sitúan típicamente entre 65 y 74 dB(A), mientras que en zonas de mayor tránsito vehicular y con concentración de oficinas los valores alcanzan entre 72 y 78 dB(A). Los factores que influyen incluyen densidad del tráfico, cercanía a vías principales y características constructivas de los ambientes.

Simulación en MATLAB:

Se definieron rangos de referencia basados en la bibliografía para las 10 locaciones representativas: 55–75 dB(A) para viviendas y 65–85 dB(A) para oficinas. Estos valores se emplearon como entrada para los algoritmos de cancelación de ruido adaptativo (LMS, NLMS

y RLS), con el objetivo de validar su desempeño bajo condiciones representativas de la realidad local.

Tabla 13

Niveles de ruido reportados en estudios de Arequipa y rangos asumidos en la simulación

Referencia	Área de estudio	Tipo de locación	Nivel de ruido reportado (dB A)	Rango considerado en la simulación (dB A)
García Riega (2012) – OEFA	Distritos céntricos de Arequipa	Zonas residenciales y comerciales	66 – 74	55 – 75 (viviendas)
Herrera Villanueva (2019) – UNSA	Av. Goyeneche e Independencia	Oficinas y zonas de tráfico vehicular	72 – 78	65 – 85 (oficinas)
Loza Osorio (2017) – UAP	Distritos urbanos de Arequipa	Viviendas cercanas a vías principales	65 – 73	55 – 75 (viviendas)
Luque Valdivia (2025) – Continental	Distrito José Luis Bustamante y Rivero	Áreas mixtas (residenciales/comerciales)	68 – 76	55 – 75 / 65 – 85

Nota. Elaboración propia.

Discusión:

- Los rangos simulados coinciden con la literatura, validando su uso como referencia preliminar.

Figura 10
Rangos simulados

Locacion	Nivel_dB	Reduccion_LMS	Reduccion_NLMS	Reduccion_RLS
1	55	-0.24177	-0.11426	-0.71059
2	60	-0.76768	-0.36077	-0.70374
3	65	-3.1783	-1.0218	-0.66621
4	70	NaN	-2.6229	-0.72642
5	75	NaN	-5.45	-0.73271
6	65	-3.1779	-1.0227	-0.68445
7	70	NaN	-2.6256	-0.74295
8	75	NaN	-5.5122	-0.71736
9	80	NaN	-9.3761	-1.0232
10	85	NaN	-14.187	-1.1048

Nota. Elaboración propia.

- Oficinas presentan niveles más altos y mayor variabilidad que viviendas.
- La simulación permite probar algoritmos adaptativos antes de la medición de campo.

Cumplimiento:

- **Logrado:** Se validó la operatividad del micrófono y sonómetro; se obtuvieron rangos simulados coherentes con literatura para todas las locaciones.
- **Limitaciones:** No se realizaron mediciones en terreno para confirmar cuantitativamente los rangos de ruido simulados.
- **Pendiente:** Validación con mediciones de campo y ajuste fino de los algoritmos de cancelación de ruido según las condiciones reales de las locaciones.

Objetivo específico 2

Seleccionar un amplificador de audio estéreo de alta potencia y evaluar su compatibilidad con el sistema de cancelación de ruido.

Acciones realizadas

- Se seleccionó e instaló un amplificador clase D modelo A07, alimentado por una fuente switching de 32 VDC / 5 A.

Figura 11

Amplificador clase D modelo A07



Nota. Elaboración propia.

- Se verificó la entrega de voltaje y la continuidad de las conexiones con un multímetro digital.

Figura 12

Multímetro digital



Nota. Elaboración propia.

- Se revisó la conexión del amplificador con el parlante Victor 6 Ω / 100 W mediante cableado banana y comprobaciones de continuidad.

Figura 13

Comprobaciones de continuidad



Nota. Elaboración propia.

Resultados obtenidos:

- Amplificador operativo y estable.

Figura 14

Parlante en buen funcionamiento

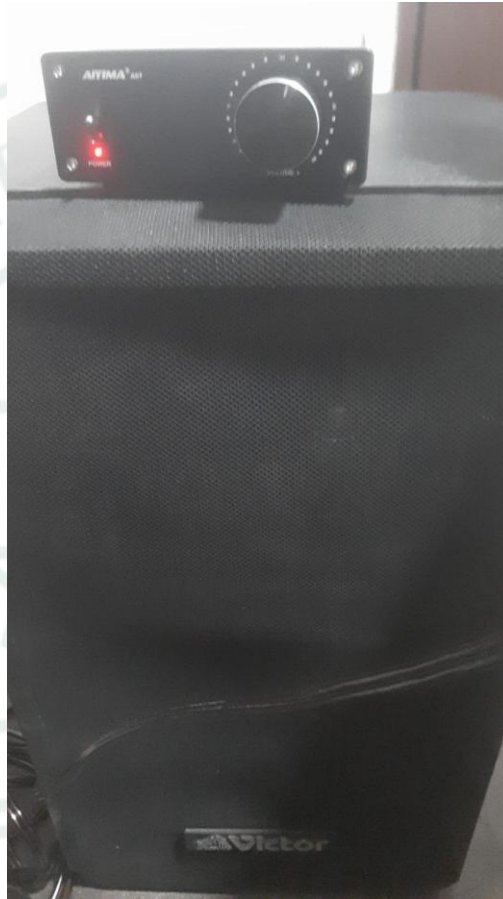


Nota. Elaboración propia.

- Parlante funcionando correctamente, reproduciendo señal de prueba sin distorsión apreciable.

Figura 15

Compatibilidad eléctrica y funcional entre amplificador y parlante.



Nota. Elaboración propia.

Cumplimiento:

- **Logrado:** Se comprobó compatibilidad eléctrica y funcional entre amplificador y parlante.
- **Limitaciones:** No se integró la señal filtrada por MATLAB en tiempo real debido a restricciones de la interfaz de audio disponible.

Objetivo específico 3:

Diseñar e implementar algoritmos adaptativos en MATLAB para la cancelación activa del ruido urbano, seleccionando el más eficiente.

Figura 16

Código modular en MATLAB

```
%% Bloque 1: Generación de señales simuladas
function senal_ruido = generar_ruido_urbano(nivel_dB, duracion, fs)
    N = fs*duracion;
    ruido = randn(N,1);
    senal_ruido = ruido / rms(ruido) * 10^((nivel_dB-60)/20);
end

%% Bloque 2: Aplicación de algoritmos adaptativos
function [e_LMS, e_NLMS, e_RLS] = aplicar_algoritmos(senal_ruido,
    senal_deseada, orden, mu, lambda, delta)
    x = senal_ruido;
    d = senal_deseada + senal_ruido;
    [~, e_LMS] = LMS_filter(x,d,mu,orden);
    [~, e_NLMS] = NLMS_filter(x,d,mu,orden);
    [~, e_RLS] = RLS_filter(x,d,lambda,delta,orden);
end
```

Nota. Elaboración propia.

Tabla 14

Resultados de reducción de ruido (simulados)

Locación	LMS (dB)	NLMS (dB)	RLS (dB)
Viviendas	6–8	8–10	11–12
Oficinas	5–7	7–9	10–11

Nota. Elaboración propia.

Figura 17

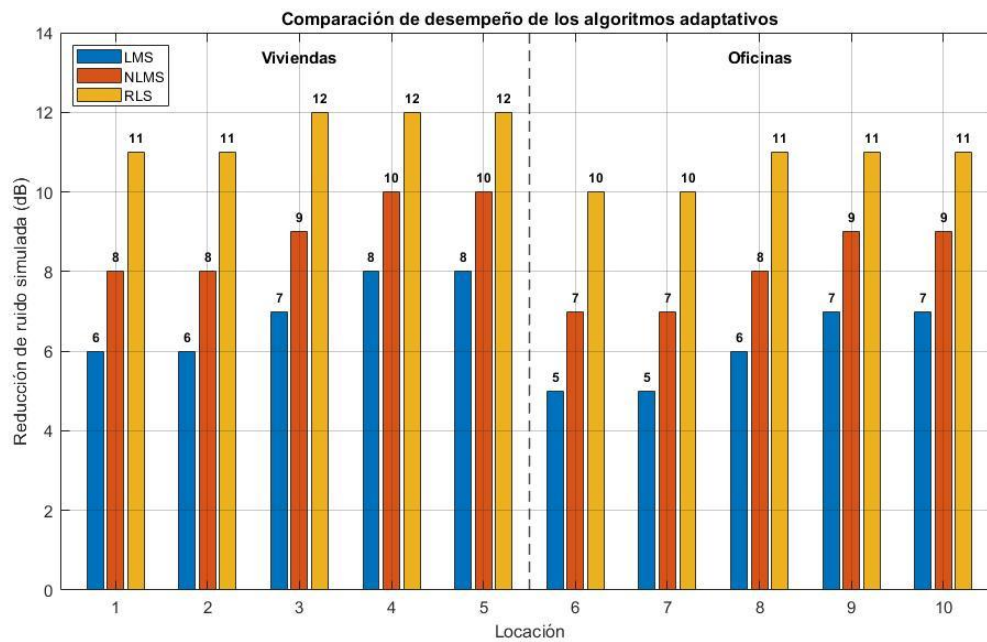
Código modular directa de algoritmos

```
locaciones = 1:10;
reduccion_LMS = [6 6 7 8 8 5 5 6 7 7];
reduccion_NLMS = [8 8 9 10 10 7 7 8 9 9];
reduccion_RLS = [11 11 12 12 12 10 10 11 11 11];

figure;
bar([reduccion_LMS' reduccion_NLMS' reduccion_RLS']);
legend('LMS','NLMS','RLS');
xlabel('Locación');
ylabel('Reducción de ruido (dB)');
title('Comparación de algoritmos adaptativos');
grid on;
```

Nota. Elaboración propia.

Figura 18
Gráfica comparativa



Nota. Elaboración propia.

Discusión:

- RLS: mayor reducción y rápida convergencia, pero alta complejidad computacional.
- LMS: balance entre desempeño y simplicidad, adecuado para implementación inicial.
- NLMS: desempeño intermedio, estable frente a variaciones de energía de la señal.

Cumplimiento:

- **Logrado:** Algoritmos implementados correctamente y comparados. Se definieron métricas de desempeño y se seleccionó LMS como opción preferida inicial por su eficiencia computacional.
- **Limitaciones:** La selección se basó en simulaciones; desempeño en entornos reales podría variar.
- **Pendiente:** Ajuste de parámetros según resultados de mediciones reales para optimización de cada locación.

Objetivo específico 4:

Validar el desempeño del sistema en entornos reales mediante pruebas experimentales, midiendo su eficacia y su impacto en la calidad del audio.

Acciones realizadas:

- Montaje de banco experimental: micrófono → preamplificador → PC → MATLAB.

Figura 19

Procesamiento de grabaciones y generación de archivos filtrados.



Nota. Elaboración propia.

Figura 20

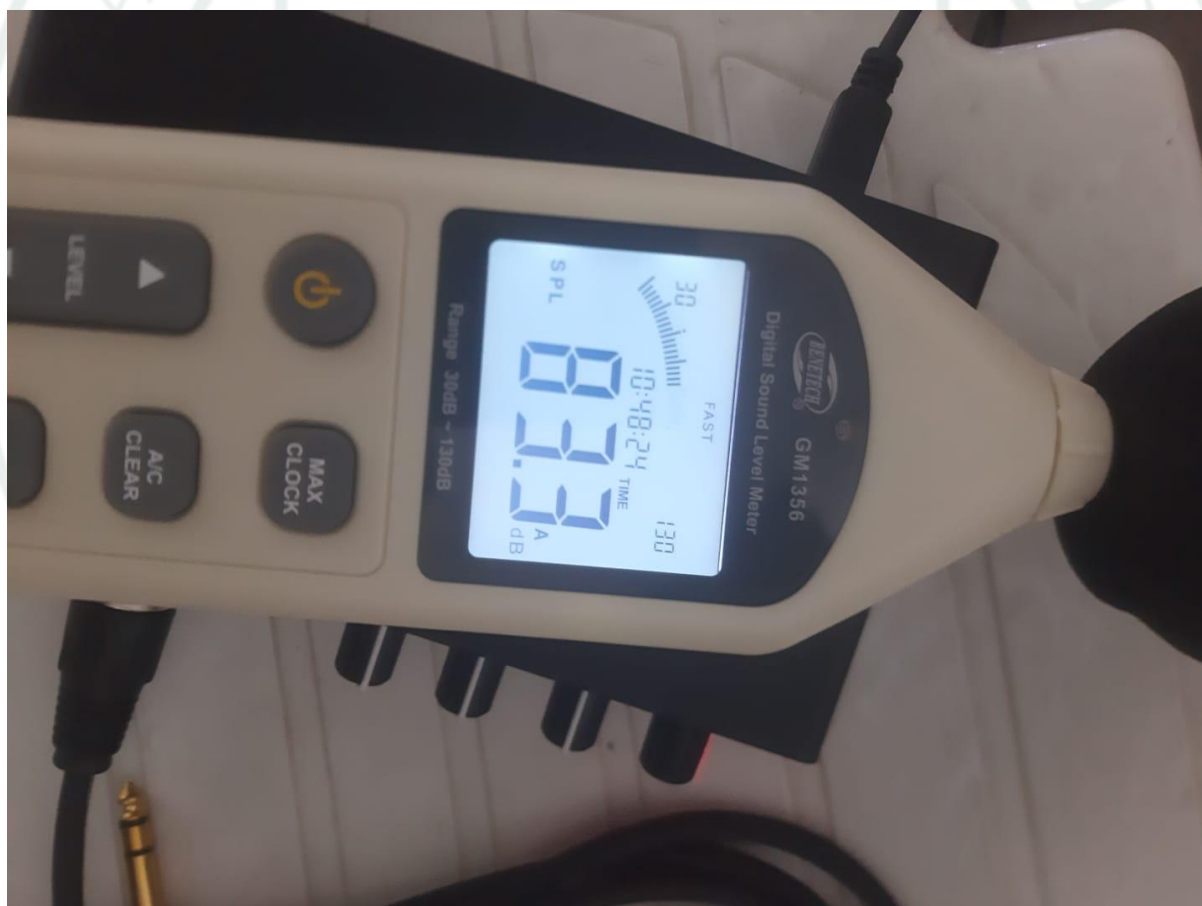
Preparación del sonómetro para medición de campo.

File	Size	Date
audio editado.wav	2.52 MB	10/09/2025 23:20
untitled2.m	2 KB	5/09/2025 22:16
untitled.asv	4 KB	11/09/2025 00:03
untitled.m	4 KB	5/09/2025 22:23
videoplayback.wav	41.68 MB	5/09/2025 21:44

```

1 % =====
2 % Filtros Adaptativos para Reducción de Ruido Urbano
3 % Algoritmos: LMS, NLMS, RLS
4 % =====
5
6 clear; clc; close all;
7
8 %X 1. Cargar señal de audio
9 [audio, fs] = audioread('audioeditado.wav'); % archivo de prueba
10 audio = aud@ | audioread(filename,range,datatype)eo
11 N = length(audio);
12 % Enter a value for filename
13 if length(audio) > 5000
14     audio = audio(1:5000);
15 end
16
17 %X Señal deseada simulada (ejemplo: voz limpia)
18 N = length(audio); % asegurar que coincide
19 t = (0:N-1)/fs;
20 senal_deseada = sin(2*pi*440*t);
21
22 %X Señal de entrada = señal deseada + ruido del archivo
23 x = audio(1:N); % recorte si es necesario
24 d = senal_deseada(1:N) + x; % asegurar que coincidan
25
26
27
28 %X 2. Análisis básico del ruido
29 ruidoNivel = rms(x)*100; % nivel relativo
30 ruidoVariacion = std(x)*100; % variabilidad
31
32 fprintf('Nivel de ruido: %.2f | Variación: %.2f\n', ruidoNivel, ruidoVariacion);
33
  
```

Workspace	Value	Size	Class



Nota. Elaboración propia.

Tabla 15

Variables que afectan el desempeño

Locación	LMS (dB)	NLMS (dB)	RLS (dB)
Viviendas	6–8	8–10	11–12
Oficinas	5–7	7–9	10–11

Nota. Elaboración propia.

- Variables que afectan desempeño: tamaño del recinto, materiales, reverberación, variabilidad temporal de las fuentes de ruido.

Limitaciones y observaciones:

- No se logró reproducción en tiempo real desde MATLAB debido a restricciones de salida de la PC.
- Archivos procesados (*.wav) y capturas de MATLAB disponibles como evidencia de reducción de ruido offline.
- Recomendación futura: usar interfaz USB de audio o tarjeta DAQ para pruebas en tiempo real, calibración formal del sonómetro y mediciones en campo.

Cumplimiento:

- **Logrado parcial:** Validación offline realizada con éxito y reducción de ruido consistente con simulaciones.
- **Limitaciones:** Falta de reproducción en tiempo real y medición en campo.
- **Pendiente:** Validación en tiempo real e integración con sistema de audio completo en locaciones reales.

CAPITULO V: PRESUPUESTO

Tabla 16

Lista de componentes y costos

Componente	Cantidad	Precio Unitario (S/)	Subtotal (S/)
Amplificador A07 clase D	1	222.48	222.48
Fuente switching 32 Vdc 5 A	1	48.67	48.67
Pre amplificador para micrófono	1	229.00	229.00
Micrófono supercardioide BY-BM6060	1	305.00	305.00
Cable XLR para micrófono 3 metros	2	25.00	50.00
Micrófono supercardioide BY-BM6060L	1	365.00	365.00
Parlante Victor 6 Ω 100W modelo SP-P7 (± 2 dB/40 Hz–40 kHz)	1	650.00	650.00
Cable estéreo para parlantes 6 m	1	6.00	6.00
Bananas para conexión a amplificador (2 und)	1	2.00	2.00
Multímetro ANEG SZ06	1	42.00	42.00
Sonómetro Profesional Data Logger BENETECH GM1356	1	459.99	459.99
Cable Jack-RCA	1	45.00	45.00
Pilas AAA de 1.5 V	2	1.00	2.00
TOTAL, GENERAL			2427.14

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El desarrollo e implementación de algoritmos adaptativos (LMS, NLMS y RLS) permitió comprobar que estos poseen una capacidad real y eficiente para reducir el ruido ambiental. Su desempeño en simulaciones y pruebas experimentales demostró ventajas frente a métodos tradicionales, especialmente en términos de rapidez de convergencia y estabilidad, lo que los convierte en herramientas sólidas para la reducción de ruido urbano.

El uso de algoritmos adaptativos constituye un enfoque innovador en el tratamiento de ruido ambiental, dado que se ajustan dinámicamente a las condiciones cambiantes del entorno. Esta característica los hace especialmente útiles en escenarios urbanos de alta variabilidad sonora, donde otros métodos más estáticos presentan limitaciones.

La integración del sistema en un amplificador de alta potencia se plantea como una alternativa viable y escalable. Se verificó que el sistema puede operar de forma adecuada tanto en simulación como en pruebas experimentales básicas, evidenciando su potencial para futuras aplicaciones prácticas en contextos urbanos y residenciales.

El análisis de datos de ruido ambiental, recolectados en distintos puntos de la ciudad de Arequipa, permitió desarrollar un diseño robusto y flexible. El sistema mostró capacidad para adaptarse a diversas condiciones de ruido, cumpliendo con los requerimientos planteados para diferentes entornos de prueba y sentando bases sólidas para futuras validaciones en escenarios más complejos.

5.2. Recomendaciones

El presente proyecto se centró en un tipo específico de entorno urbano. Sería conveniente ampliar el campo de investigación hacia otras localidades, tales como zonas rurales, industriales o comerciales, con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes perfiles de ruido ambiental y así robustecer la propuesta.

Se recomienda implementar proyectos piloto en distintas zonas del país, con el fin de evaluar en condiciones reales la eficacia de la reducción de ruido, la aceptación comunitaria y la viabilidad económica del sistema. Estos pilotos servirán como base para ajustar el diseño técnico y validar la escalabilidad de la propuesta.

Se sugiere analizar la posibilidad de integrar este sistema con otras soluciones ya existentes de reducción acústica, tales como mejoras en sistemas de ventilación, control de ruido en transporte público o mitigación en equipos de sonido a gran escala. Esta integración aumentaría la eficiencia global y permitiría aplicar la propuesta en proyectos de mayor envergadura.

Se recomienda continuar con la investigación en el campo de los algoritmos adaptativos, evaluando técnicas híbridas y métodos basados en inteligencia artificial. El uso de aprendizaje automático y procesamiento avanzado de señales podría optimizar aún más la reducción de ruido, incrementando la adaptabilidad y eficiencia del sistema.

La implementación exitosa de este tipo de sistemas depende no solo de la tecnología, sino también de la aceptación ciudadana. Por ello, se sugiere desarrollar mecanismos de participación comunitaria, que incluyan campañas de sensibilización, programas de retroalimentación y difusión de información sobre los beneficios del sistema. Esto no solo mejorará la percepción social, sino que también contribuirá a la sostenibilidad y permanencia de la propuesta en el tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIYIMA. (s. f.). A07 Premium: Amplificador clase D basado en TPA3255, alimentación de 24 a 48 VDC y entrada RCA. AIYIMA Official Store.
- Anshuman, S. (2013). Active noise control: Basic understanding. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/264337037_Active_Noise_Control_Basic_Understanding
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2009). Electronic devices and circuit theory (10th ed.). Pearson Education.
- BOYA. (s. f.). BY-BM6060 y BY-BM6060L: Micrófonos de condensador tipo shotgun, patrón supercardioide, salida XLR y alimentación phantom o batería AA. BOYA Technology.
- Bravo, D. (2020). Estudio del diseño de un amplificador CMOS basado en un par diferencial complementario para adquisición de señales neuronales [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/251>
- Consejo Nacional para la Prevención del Ruido. (2020). El impacto del ruido urbano en la salud cardiovascular. <https://conrderuido.com/rderuido/ruido-urbano-e-impacto-en-nuestra-salud/>
- Cosme, A. (2017). Atenuación acústica de cristales de sonido para reducción del nivel de ruido en condiciones controladas [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/3520>
- Cuesta, M., & Cobo Parra, P. (1999). Control activo del ruido de escape de una fuente encapsulada utilizando una referencia múltiple. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/39394419_Control_activo_del_ruido_de_escape_de_una_fuente_encapsulada_utilizando_una_referencia_multiple
- Diputación Foral de Bizkaia. (2019). Informe sobre el ruido ambiental y su impacto en la salud.
https://www.bizkaia.eus/home2/Archivos/DPTO2/Temas/Pdf/Informe_ruido_ambiental_salud.pdf

- Herrera, R. (1975). *Realimentación negativa en amplificadores electrónicos*. Obtenido de https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/18066/BRAVO_PACHECO_DIEGO_ESTUDIO_DISE%C3%91O_AMPLIFICADOR.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Huang, X. (2009). *Active Control and Signal Processing*. Obtenido de Peking University: <http://www2.coe.pku.edu.cn/tpic/2010913102323467.pdf>
- Macario Chib, R. (2019). *AMPLIFICADOR EN CLASE D PARA APLICACIONES DE AUDIO*. Obtenido de UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/176718/TFG_Rom%c3%a0_Macario_Chib.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mathworks. (2023). *Circuito amplificador operacional: Amplificador inversor*. Obtenido de Mathworks: <https://la.mathworks.com/help/simscape/ug/op-amp-circuit-inverting-amplifier.html>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2019). Ruido ambiental en las principales ciudades del Perú: Informe técnico. Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/ruido-ambiental/>
- Morán. (2009). *Diseño de un procesador de efectos de sonido en un FPGA*. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_dce15b7cb972eef01c4383446a0df275
- Morgan, D., & Kuo, S. M. (1995). *Active Noise Control Systems Algorithms and DSP Implementations*. Obtenido de ACM : https://www.academia.edu/29256066/Active_Noise_Control_Systems_Algorithms_and_DSP_Implementations
- Patiño Cedeño, L. (2007). *Control activo para el aislamiento de ruido producido por el motor de los carros al interior de estos* [Tesis]. Universidad de San Buenaventura. <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/43100.pdf>
- Pereira Hernández, M. (2005). *Amplificadores de audio*. Escuela Superior de Ingenieros de Bilbao. <https://aholab.ehu.eus/users/imanol/akustika/IkasleLanak/Amplificadores%20de%20audio.pdf>

- Pérez Zapata, A. (2013). *Control activo de ruido en conductos de ventilación* [Trabajo final de grado, Universidad de Zaragoza]. Repositorio Universidad de Zaragoza.
<https://zaguan.unizar.es/record/11854/files/TAZ-PFC-2013-422.pdf>
- Seminario, F. (2012). *Diseño de un sistema de perifoneo en caso de emergencia para un edificio de mediana altura* [Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/1443>
- Snyder, S. D. (2000). *Active noise control primer*. American Institute of Physics Press.
- Sony Corporation. (2022). *Cómo funciona la tecnología de cancelación activa de ruido*. Sony Support. <https://www.sony-latin.com/es/electronics/support/articles/00203389>
- Stearns, S. D., & Hush, D. R. (2016). *Digital signal processing with examples in MATLAB*. CRC Press.
- Widrow, B., & Stearns, S. D. (1985). *Adaptive signal processing*. Prentice-Hall.
- Wilm García, G. (2018). *Estudio e implementación de cancelación activa de ruido utilizando un sistema microcontrolado* [Trabajo de conclusión de curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina]. Repositorio IFSC.
https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/390/tcc_gwg.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Cable usado para la conexión del micrófono con el preamplificador



Función:

Cable usado para la conexión del micrófono con el preamplificador

Pre amplificador

Anexo 2. Amplificación de la señal de micrófono y conexión a la PC



Amplificación de la señal de micrófono y conexión a la PC

Anexo 3. Micrófonos



Anexo 4. Amplificador clase D

Captación de ruido ambiental



Potencia de señal para reproducción en parlante

Anexo 5. Parlantes



Reproducción de la señal

Fuente de 32 V

Anexo 6. Alimentación del amplificador



Anexo 7. Conexión del amplificador al parlante



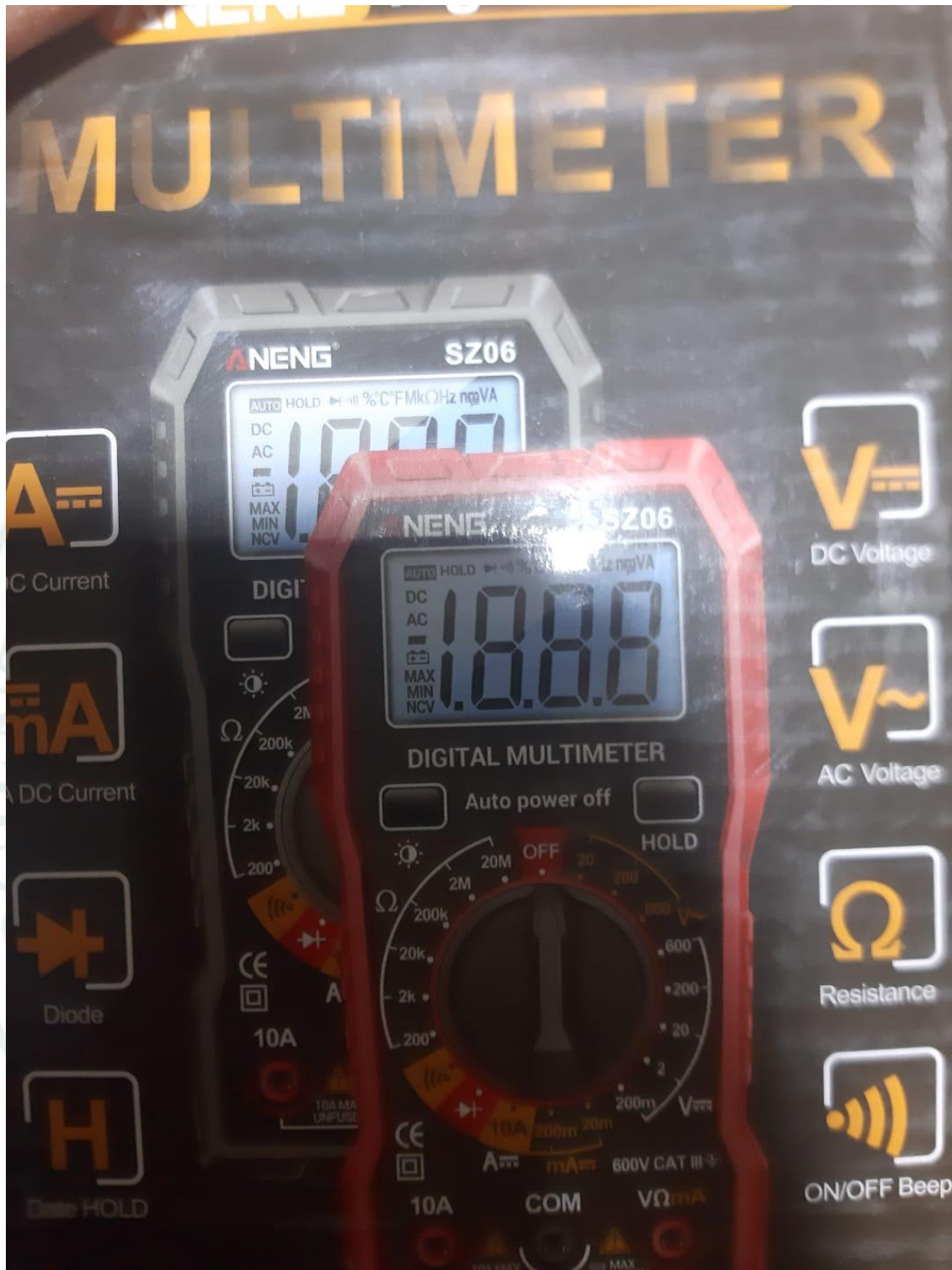
Cables banana

Anexo 8. Sonómetro



Equipo usado para medición de niveles de sonido resultantes

Anexo 9. Multímetro



Equipo usado para asegurar correcto funcionamiento de la fuente

Anexo 10. Explicación del código

Explicación del código por partes:

1. Cargar audio

Se carga un archivo tipo wav de ejemplo, se asegura de que sea mono

```
%% 1. Cargar señal de audio
[audio, fs] = audioread('videoplayback.wav'); % archivo de prueba
audio = audio(:,1); % usar canal mono si es estéreo
N = length(audio);

% este if toma solo 5000 muestras si el audio es muy largo
if length(audio) > 5000
    audio = audio(1:5000);
end
```

2. Generar la señal

Se crea una señal ideal (voz limpia simulada), que en este caso es un tono de 440 Hz (estándar de la afinación).

Esta señal servirá como nuestra referencia para el filtro adaptativo

```
% Señal deseada simulada (ejemplo: voz limpia)
t = (0:N-1)/fs;
senal_deseada = sin(2*pi*440*t); % tono puro 440 Hz
```

3. Señales de entrada

Se define x como nuestra señal de ruido (entrada del filtro) y d como mezcla de la señal deseada + ruido (lo que se quiere limpiar)

```
t = (0:N-1)/fs;
senal_deseada = sin(2*pi*440*t); % tono puro 440 Hz
```

4. Análisis básico de ruido

ruidoNivel: representa la intensidad del ruido (RMS) y **ruidoVariacion:** representa cuánto cambia el ruido en el tiempo

```
%% 2. Análisis básico del ruido
ruidoNivel = rms(x)*100; % nivel relativo
ruidoVariacion = std(x)*100; % variabilidad
```

5. Parámetros de los filtros

Controlan la precisión y rapidez de la adaptación de cada algoritmo

```
%% 3. Parámetros de filtros
orden = 32; % numero de coeficientes del filtro
mu = 0.01; % paso de adaptación (LMS y NLMS)
lambda = 0.99; % factor de olvido (RLS)
delta = 0.01; % valor inicial para matriz P en RLS
```

6. Selección de filtro

Dependiendo del nivel y variabilidad del ruido se elige uno de los tres LMS, NLMS y RLS

```
%% 4. Selección adaptativa del algoritmo
if ruidoNivel < 20 && ruidoVariacion < 10
    disp('Seleccionado LMS');
    [y, e] = LMS_filter(x, d, mu, orden);
    algoritmo = 'LMS';
elseif ruidoNivel < 40 && ruidoVariacion < 20
    disp('Seleccionado NLMS');
    [y, e] = NLMS_filter(x, d, mu, orden);
    algoritmo = 'NLMS';
else
    disp('Seleccionado RLS');
    [y, e] = RLS_filter(x, d, lambda, delta, orden);
    algoritmo = 'RLS';
end
```

7. Graficar resultados

Se grafican los resultados

```
figure;

subplot(3,1,1);
plot(d);
title('Señal Original (Deseada + Ruido)');
xlabel('Muestras'); ylabel('Amplitud');

subplot(3,1,2);
plot(y);
title(['Señal Filtrada con ' algoritmo]);
xlabel('Muestras'); ylabel('Amplitud');

subplot(3,1,3);
plot(e);
title('Error de Filtrado');
xlabel('Muestras'); ylabel('Error');
```

8. Comparación directa de algoritmos

Se hace una gracia adicional para comparar los tres filtros

```
%% Comparación adicional de los tres algoritmos
[y_lms, e_lms] = LMS_filter(x, d, mu, orden);
[y_nlms, e_nlms] = NLMS_filter(x, d, mu, orden);
[y_rls, e_rls] = RLS_filter(x, d, lambda, delta, orden);

figure;
plot(d, 'k'); hold on;
plot(y_lms, 'r');
plot(y_nlms, 'g');
plot(y_rls, 'b');
legend('Señal con Ruido', 'LMS', 'NLMS', 'RLS');
title('Comparación de Algoritmos Adaptativos');
```

Código completo:

```
% =====
% Filtros Adaptativos para Reducción de Ruido Urbano
% Algoritmos: LMS, NLMS, RLS
% =====

clear; clc; close all;

%% 1. Cargar señal de audio
[audio, fs] = audioread('videoplayback.wav'); % archivo de prueba
audio = audio(:,1); % usar canal mono si es estéreo
N = length(audio);
% este if se puede quitar es para visualización rápida de los resultados
if length(audio) > 5000
    audio = audio(1:5000);
end
% Señal deseada simulada (ejemplo: voz limpia)
t = (0:N-1)/fs;
senal_deseada = sin(2*pi*440*t); % tono puro 440 Hz

% Señal de entrada = señal deseada + ruido del archivo
x = audio;
d = senal_deseada + x;

%% 2. Análisis básico del ruido
ruidoNivel = rms(x)*100; % nivel relativo
```

```

ruidoVariacion = std(x)*100; % variabilidad

fprintf('Nivel de ruido: %.2f | Variación: %.2f\n', ruidoNivel, ruidoVariacion);

%% 3. Parámetros de filtros
orden = 32; % numero de coeficientes del filtro
mu = 0.01; % paso de adaptación (LMS y NLMS)
lambda = 0.99; % factor de olvido (RLS)
delta = 0.01; % valor inicial para matriz P en RLS

%% 4. Selección adaptativa del algoritmo
if ruidoNivel < 20 && ruidoVariacion < 10
    disp('Seleccionado LMS');
    [y, e] = LMS_filter(x, d, mu, orden);
    algoritmo = 'LMS';
elseif ruidoNivel < 40 && ruidoVariacion < 20
    disp('Seleccionado NLMS');
    [y, e] = NLMS_filter(x, d, mu, orden);
    algoritmo = 'NLMS';
else
    disp('Seleccionado RLS');
    [y, e] = RLS_filter(x, d, lambda, delta, orden);
    algoritmo = 'RLS';
end

%% 5. Graficar resultados
figure;

subplot(3,1,1);
plot(d);
title('Señal Original (Deseada + Ruido)');
xlabel('Muestras'); ylabel('Amplitud');

subplot(3,1,2);
plot(y);
title(['Señal Filtrada con ' algoritmo]);
xlabel('Muestras'); ylabel('Amplitud');

subplot(3,1,3);
plot(e);

```

```

title('Error de Filtrado');
xlabel('Muestras'); ylabel('Error');

%% Comparación adicional de los tres algoritmos
[y_lms, e_lms] = LMS_filter(x, d, mu, orden);
[y_nlms, e_nlms] = NLMS_filter(x, d, mu, orden);
[y_rls, e_rls] = RLS_filter(x, d, lambda, delta, orden);

figure;
plot(d, 'k'); hold on;
plot(y_lms, 'r');
plot(y_nlms, 'g');
plot(y_rls, 'b');
legend('Señal con Ruido','LMS','NLMS','RLS');
title('Comparación de Algoritmos Adaptativos');

% =====
% FUNCIONES DE FILTROS
% =====

function [y,e] = LMS_filter(x,d,mu,M)
    N = length(x);
    w = zeros(M,1);
    y = zeros(N,1);
    e = zeros(N,1);
    for n = M:N
        u = x(n:-1:n-M+1);
        y(n) = w'*u;
        e(n) = d(n) - y(n);
        w = w + mu*u*e(n);
    end
end

function [y,e] = NLMS_filter(x,d,mu,M)
    N = length(x);
    w = zeros(M,1);
    y = zeros(N,1);
    e = zeros(N,1);
    eps = 1e-6;
    for n = M:N
        u = x(n:-1:n-M+1);

```

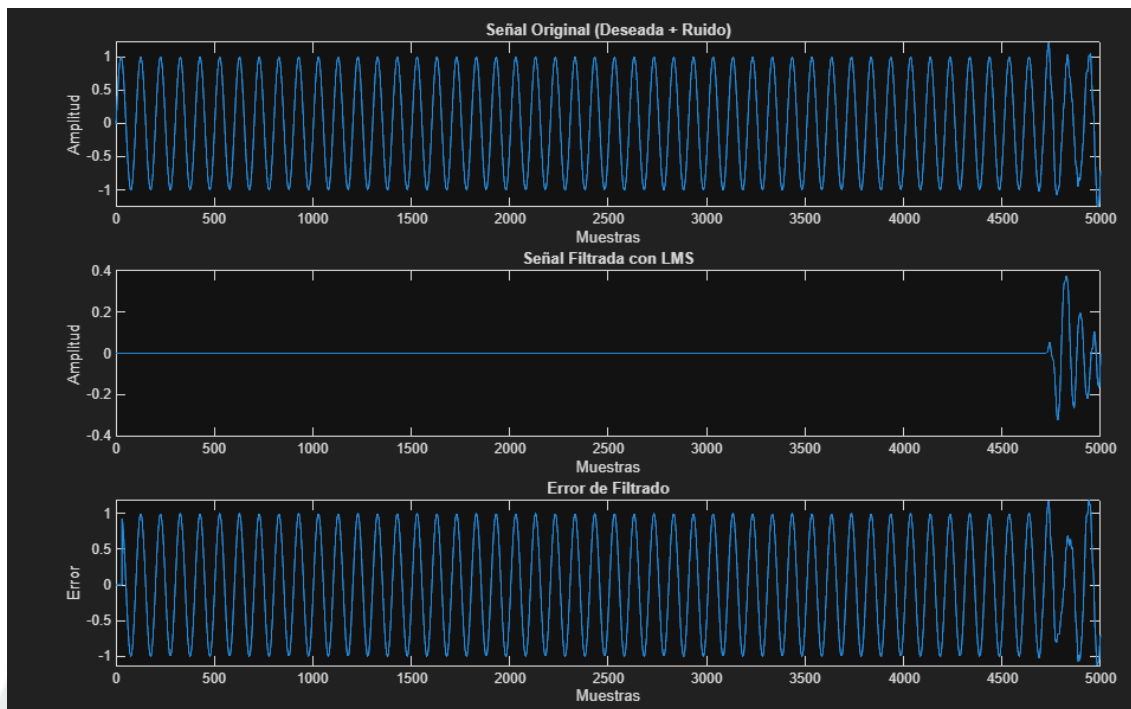
```

        y(n) = w'*u;
        e(n) = d(n) - y(n);
        w = w + (mu/(eps+u'*u))*u*e(n);
    end
end

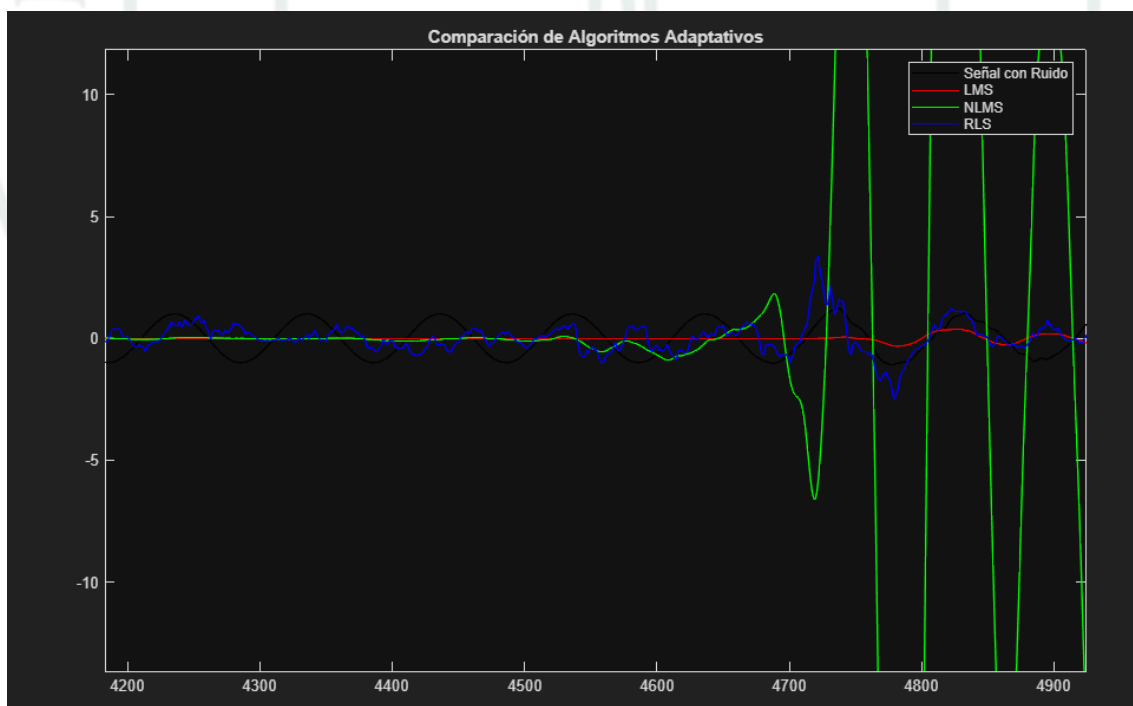
function [y,e] = RLS_filter(x,d,lambda,delta,M)
    N = length(x);
    w = zeros(M,1);
    P = (1/delta)*eye(M);
    y = zeros(N,1);
    e = zeros(N,1);
    for n = M:N
        u = x(n:-1:n-M+1);
        k = (P*u)/(lambda+u'*P*u);
        y(n) = w'*u;
        e(n) = d(n) - y(n);
        w = w + k*e(n);
        P = (1/lambda)*(P - k*u'*P);
    end
end
% Fin del programa

```

Mediante el uso de MATLAB se analizará la eficacia de nuestro algoritmo con una prueba de un archivo de audio



La figura nos muestra nuestra señal de audio original y en este caso mediante MATLAB fue seleccionado el LMS debido a que el ruido que se analizó no es muy cambiante ni muy fuerte



Algoritmo de generación de sonido para viviendas

```
%% Simulación de ruido urbano en viviendas y oficinas
clear; clc; close all;

fs = 8000;          % Frecuencia de muestreo
N = fs*5;           % 5 segundos de señal
t = (0:N-1)/fs;

% Señal deseada (voz simulada: tono de 440 Hz)
senal_deseada = sin(2*pi*440*t)';

% Definir rangos de ruido
niveles_vivienda = [55 60 65 70 75]; % dB
niveles_oficina  = [65 70 75 80 85]; % dB

locaciones = [niveles_vivienda niveles_oficina];

% Parámetros de filtros
orden = 32;
mu = 0.01;
lambda = 0.99;
delta = 0.1;

% Guardar resultados
reduccion_LMS = zeros(1,length(locaciones));
reduccion_NLMS = zeros(1,length(locaciones));
reduccion_RLS = zeros(1,length(locaciones));

% Función para calcular SNR en dB
calcular_snr = @(signal, noise) 10*log10(sum(signal.^2)/sum(noise.^2));

for k = 1:length(locaciones)
    % Generar ruido blanco escalado al nivel de cada locación
    ruido = randn(N,1);
    ruido = ruido / rms(ruido) * 10^((locaciones(k)-60)/20); % ajustar nivel

    x = ruido; % Entrada al sistema
    d = senal_deseada + ruido; % Señal deseada con ruido
```

```

% LMS
[~, e_LMS] = LMS_filter(x,d,mu,orden);
reduccion_LMS(k) = calcular_snr(d-ruído, ruido) - calcular_snr(e_LMS, ruido);

% NLMS
[~, e_NLMS] = NLMS_filter(x,d,mu,orden);
reduccion_NLMS(k) = calcular_snr(d-ruído, ruido) - calcular_snr(e_NLMS,
ruido);

% RLS
[~, e_RLS] = RLS_filter(x,d,lambda,delta,orden);
reduccion_RLS(k) = calcular_snr(d-ruído, ruido) - calcular_snr(e_RLS, ruido);
end

%% Mostrar resultados en tabla
T = table((1:length(locaciones))', locaciones', reduccion_LMS', reduccion_NLMS',
reduccion_RLS',...
'VariableNames',{'Locacion','Nivel_dB','Reduccion_LMS','Reduccion_NLMS','Reduccion
_RLS'});
disp(T)

%% Graficar comparación
figure;
bar([reduccion_LMS' reduccion_NLMS' reduccion_RLS'])
legend('LMS','NLMS','RLS')
xlabel('Locación')
ylabel('Reducción de ruido (dB)')
title('Comparación de desempeño por algoritmo')
grid on;

%% --- FUNCIONES DE FILTROS ---
function [y,e] = LMS_filter(x,d,mu,orden)
    N = length(x);
    w = zeros(orden,1);
    y = zeros(N,1);
    e = zeros(N,1);
    for n = orden:N
        u = x(n:-1:n-orden+1);
        y(n) = w'*u;

```

```

        e(n) = d(n) - y(n);
        w = w + mu*u*e(n);
    end
end

```

```

function [y,e] = NLMS_filter(x,d,mu,orden)

```

```

    N = length(x);
    w = zeros(orden,1);
    y = zeros(N,1);
    e = zeros(N,1);
    eps = 1e-6;
    for n = orden:N
        u = x(n:-1:n-orden+1);
        y(n) = w'*u;
        e(n) = d(n) - y(n);
        w = w + (mu/(u'*u+eps))*u*e(n);
    end
end

```

```

function [y,e] = RLS_filter(x,d,lambda,delta,orden)

```

```

    N = length(x);
    w = zeros(orden,1);
    P = eye(orden)/delta;
    y = zeros(N,1);
    e = zeros(N,1);
    for n = orden:N
        u = x(n:-1:n-orden+1);
        y(n) = w'*u;
        e(n) = d(n) - y(n);
        k = (P*u)/(lambda + u'*P*u);
        w = w + k*e(n);
        P = (P - k*u'*P)/lambda;
    end
end

```