



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Diseño de un sistema de cancelación activa FxLMS de
ruidos domésticos en personas con trastorno del
espectro autista (TEA)**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR

Diego Arturo SOLANO ORELLANA

ASESOR

Mg. Ricardo YAURI RODRÍGUEZ

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Solano, D. (2025). *Diseño de un sistema de cancelación activa FxLMS de ruidos domésticos en personas con trastorno del espectro autista (TEA)*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Diego Arturo Solano Orellana
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72749717
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0008-1490-3178
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Ricardo Yauri Rodriguez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	41900467
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9884-9317
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Nicanor Raúl Benites Saravia
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10189914
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jean Carlos Malca Fernandez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	45535181
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Williams Fernando Acosta Solorzano
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06434186
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.10 Sistemas de control
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica

Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Urbanización: Palomino – Primera Etapa Latitud: -12.05919 Longitud: -77.06890
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024 – 2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería Electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01 Sistemas de automatización, Sistemas de control https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.03 Ingeniería de audio, Análisis de confiabilidad https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.06



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN TESIS

ACTA N°20/FIEE-CTGT/2025

Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 14 de agosto del 2025, como presidente de Jurado el **DR. NICANOR RAÚL BENITES SARA VIA**, integrado por el Miembro de Jurado el **MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ**, el Miembro de Jurado **DR. WILLIAMS FERNANDO ACOSTA SOLORZANO** y Miembro Asesor el **MG. RICARDO YAURI RODRÍGUEZ**.

Después de escuchar la Sustentación Presencial de la Tesis del Bachiller **DIEGO ARTURO SOLANO ORELLANA** con código 15130201 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico sustentó el trabajo de Tesis titulado **DISEÑO DE UN SISTEMA DE CANCELACIÓN ACTIVA FXLMS DE RUIDOS DOMÉSTICOS EN PERSONAS CON TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA (TEA)**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de 15 (QUINCE).

Ciudad Universitaria, 14 de agosto del 2025

DR. NICANOR RAÚL BENITES SARA VIA
Presidente Jurado

MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ
Miembro Jurado

DR. WILLIAMS FERNANDO ACOSTA SOLORZANO
Miembro Jurado

MG. RICARDO YAURI RODRÍGUEZ
Miembro Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo , **RICARDO YAURI RODRÍGUEZ** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°01/FIEE-CTGT/2025 de la Tesis titulada: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE CANCELACIÓN ACTIVA FXLMS DE RUIDOS DOMÉSTICOS EN PERSONAS CON TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA (TEA).**, presentado por el bachiller DIEGO ARTURO SOLANO ORELLANA, para optar al título profesional de Ingeniero Electrónico. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 12% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título de Ingeniero Electrónico.

Lima, 14 de Agosto de 2025

Firma del Asesor

DNI: 41900467

Nombres y apellidos del asesor:

RICARDO YAURI RODRÍGUEZ

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi sobrino Michael, quien padece Trastorno del Espectro Autista y fue mi inspiración para poder realizar esta tesis. A mis padres y hermanas, por el apoyo incondicional brindado a lo largo de estos cinco años de carrera. Y, por último, a mí mismo, por haber culminado una etapa significativa de mi vida que recordaré con profundo sentimiento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi familia y la universidad por haber sido pilares fundamentales en este avance hacia mi desarrollo profesional. Gracias por acompañarme en cada paso de mi carrera universitaria y por brindarme las herramientas educativas necesarias para continuar aprendiendo y mejorar día a día.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación aborda el diseño de un sistema de cancelación de ruido activo utilizando el algoritmo FXLMS en auriculares para la cancelación de cuatro tipos de ruidos (Ruido de pirotecnia, ruido de motor de licuadora, ruido de golpe de puerta y ruido de ladridos de perro) que fueron analizados, evaluados y graficados. Así mismo, se modelaron las rutas de propagación Primary Path y Secondary Path a partir de una base de datos para su integración en el diseño de cancelación y así adaptar el sistema a los auriculares in ear Bose QC20. El proceso resultó ser efectivo en la cancelación de frecuencias bajas para los cuatro tipos de ruido procesados, permitiendo una mayor adaptabilidad al ruido para personas con Trastorno del Espectro Autista mediante la variación del valor del coeficiente de convergencia.

Palabras clave: Cancelación de ruido activo, caminos de propagación, filtro adaptativo, atenuación, respuesta en frecuencia.

ABSTRACT

The present research work presents the design of an active noise cancellation system using the FXLMS algorithm in headphones to cancel four types of noise (fireworks noise, blender motor noise, door slam noise, and dog barking noise) that were analyzed, evaluated, and graphed. Additionally, the Primary Path and Secondary Path propagation routes from a database were modeled for incorporation into the cancellation design, adapting the system to Bose in-ear headphones. The system proved effective in its cancellation response for low frequencies with the four processed types of noise, allowing adaptability to noise for people with autism spectrum disorder by adjusting the convergence coefficient value.

Keywords: Active noise canceling, paths propagation, adaptive filter, attenuation, frequency response.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
TABLA DE CONTENIDO	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS	xiv
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Descripción del problema	1
1.3 Definición del problema	3
1.4 Formulación del problema	5
1.4.1 Problema general	6
1.4.2 Problemas específicos	6
1.5 Delimitación del proyecto	6
1.6 Objetivos	7
1.6.1 Objetivo general	7
1.6.2 Objetivos específicos	7
1.7 Organización de la tesis	7
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1 Marco conceptual	8
2.1.1 Trastorno del Espectro Autista	8
2.1.2 Procesamiento de señales	12
2.1.3 Percepción del sonido ante estímulos acústicos	15
2.1.4 Ruido	15
2.1.4.1 Ruidos domésticos	17
2.1.5 Técnicas de reducción de ruido	18
2.1.5.1 Cancelación de ruido pasivo	18
2.1.5.2 Cancelación de ruido activo	18

2.1.6	Filtros Adaptativos	23
2.1.7	Algoritmos de control Adaptativos	25
2.1.7.1	Algoritmo LMS.....	25
2.1.7.2	Algoritmo LMS normalizado	26
2.1.7.3	Algoritmo FxLMS:.....	27
2.2	Antecedentes del estudio.....	32
2.3	Bases teóricas.....	35
2.3.1.	Software	35
2.3.2.	Hardware y equipos	36
CAPITULO III: METODOLOGÍA.....		38
3.1	Hipótesis.....	38
3.1.1	Hipótesis general	38
3.1.2	Hipótesis específicas	38
3.2	Variables	38
3.2.1	Variable independiente	38
3.2.2	Variable dependiente:	38
3.3	Operacionalización de Variables	39
3.3.1	Dimensiones de la variable independiente.....	39
3.4	Enfoque de la investigación	39
3.5	Alcance de la investigación.....	39
3.6	Diseño de la investigación	39
3.7	Técnicas e instrumentos de recolección de información	40
3.7.1	Instrumentos de recolección de datos	40
3.7.2	Técnicas de recolección de datos	40
CAPITULO IV: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN.....		41
4.1	Metodología para el desarrollo de la solución	41
4.2	Características del sistema de cancelación de ruido doméstico	42
4.2.1	Adquisición de ruido doméstico que afecta a las personas con TEA	43
4.2.2	Recopilación y evaluación de datos de ruidos domésticos en Matlab	45
4.2.3	Análisis de las características del ruido doméstico	48

4.3	Modelamiento del sistema de cancelación de ruidos domésticos en auriculares para personas con TEA.....	49
4.3.1	Selección del sistema de cancelación de ruido activo	49
4.3.2	Incorporación de respuesta al impulso del camino primario y secundario	50
4.4.	Diseño y simulación del sistema de cancelación de ruido doméstico en función del coeficiente de convergencia	54
4.4.1.	Diseño del sistema de cancelación de ruido activo Feedforward FxLMS	54
4.4.2.	Simulación y validación del sistema de cancelación y de ruidos domésticos	58
CAPITULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		59
5.1.	Características determinadas del ruido doméstico	59
5.2.	Modelamiento del sistema de cancelación de ruido.....	67
5.2.1.	Selección del sistema de cancelación de ruido activo	67
5.2.2.	Incorporación de caminos primarios y secundarios	70
5.3.	Diseño y simulación del sistema en base al coeficiente de convergencia	76
5.3.1.	Diseño del sistema de cancelación feedforward FxLMS.....	76
5.3.2.	Simulación y validación del diseño del sistema.....	79
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		100
6.1.	Conclusiones	100
6.2.	Recomendaciones.....	101
6.2.1.	Futuros Trabajos	101
6.2.2.	Limitaciones.....	102
CAPITULO VII: REFERENCIAS.....		104
CAPITULO IX: ANEXOS		109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Prevalencia de autismo por cada 10000 personas de 2012 a 2021. Fuente: (Zeidan et al., 2022).....	4
Figura 2: Población con diagnóstico TEA inscrita en CONADIS por nivel de gravedad del año 2000 al 2018. Fuente: (CONADIS, 2019).....	5
Figura 3: Formato discreto de una señal sinusoidal muestreada. Fuente: (Proakis & Manolakis, 1996)	13
Figura 4: Proceso de niveles de cuantificación de una señal. Fuente: (Kahrs, 2002).....	14
Figura 5 Curvas de Ponderación auditiva. Fuente:(Merino & Muñoz-Repiso, 2013).....	15
Figura 6: Concepto físico de cancelación activa de ruido. Fuente: (Kuo & Morgan, 1996)	19
Figura 7: Diagrama de control de ruido FeedForward. Fuente: (H. Hansen, 2001).....	20
Figura 8: Diagrama de sistema Feedforward de banda ancha para cancelación de ruido. Fuente: (Kuo & Morgan, 1996).....	21
Figura 9: Diagrama de sistema Feedforward de banda limitada para cancelación de ruido. Fuente: (Kuo & Morgan, 1996).....	22
Figura 10: Diagrama de control de ruido activo FeedBack. Fuente: (H. Hansen, 2001).....	22
Figura 11: Diagrama de bloques del filtro de respuesta al impulso infinita (IIR). Fuente: (Hansen & Scott Snyder, 2012).....	23

Figura 12: Diagrama de bloques del filtro de respuesta finita al impulso (FIR). Fuente: (Hansen & Scott Snyder, 2012).....	24
Figura 13: Estructura de un Algoritmo LMS para un coeficiente adaptativo del filtro FIR. Fuente: (Laita, 2012).....	26
Figura 14: Diagrama de un sistema adaptativo de control de ruido activo FxLMS Feedforward. Fuente: (Qiu et al., 2014).....	28
Figura 15 Respuesta en frecuencia de micrófono Behringer ECM 8000. Fuente: (Behringer, 2013)	36
Figura 16: Interfaz de audio Minifuse 2. Fuente: (Arturia, 2021)	37
Figura 17: Fases del desarrollo de la investigación. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 18: Proceso de adquisición de características del sistema de cancelación de Ruido Doméstico. Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 19: Proceso de grabación de ruido doméstico. Fuente: Elaboración Propia.....	45
Figura 20: Diagrama de flujo de recopilación de datos. Fuente: Elaboración Propia	46
Figura 21: Diagrama de flujo del modelamiento del sistema. Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 22: Estructura de audífonos in ear con electrónica de cancelación de ruido. Fuente: (Liebich et al., 2019).	51
Figura 23: Diagrama de bloques de algoritmo FXLMS estimación secundaria. Fuente: (Sahib & Kamil, 2011)	53
Figura 24: Diagrama de flujo del sistema de cancelación de ruido activo. Fuente: Elaboración Propia	57
Figura 25: Señales de ruido doméstico en función del tiempo: (a) ruido pirotécnico, (b) ruido de licuadora (c) ruido de golpe de puerta (d) ruido de ladrido de perros. Fuente: Elaboración Propia.	59

Figura 26: Señales domésticas en función de la frecuencia: (a) ruido pirotécnico, (b) ruido de licuadora (c) ruido de golpe de puerta (d) ruido de ladrido de perros.	61
Figura 27: Características visuales de ruido pirotécnico. Fuente: Elaboración Propia	64
Figura 28: Características visuales de ruido de licuadora. Fuente: Elaboración Propia	65
Figura 29: Características visuales de ruido de golpe de puerta. Fuente: Elaboración Propia	66
Figura 30: Características visuales de ruido de ladridos. Fuente: Elaboración Propia	66
Figura 31: Respuesta al impulso de camino primario. Fuente: Elaboración Propia.....	71
Figura 32: Respuesta en función de la frecuencia de camino primario. Fuente: Elaboración Propia.	72
Figura 33: Respuesta al impulso de camino secundario. Fuente: Elaboración Propia	73
Figura 34: Respuesta en frecuencia de camino secundario. Fuente: Elaboración Propia	74
Figura 35: Estimación iterativa de camino secundario. Fuente: Elaboración Propia.	75
Figura 36: Estimación de respuesta al impulso de camino secundario. Fuente: Elaboración Propia	76
Figura 37: Respuesta al impulso de camino primario filtrado en frecuencias bajas. Fuente: Elaboración Propia.....	77
Figura 38: Evolución de coeficientes del filtro adaptativo. Fuente: Elaboración Propia	79
Figura 39. Error cuadrático medio a través del tiempo. Fuente: Elaboración propia.....	80

Figura 40: Señal sinusoidal atenuada en el tiempo. Fuente: Elaboración Propia.....	81
Figura 41: Señal sinusoidal atenuada en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia.	82
Figura 42: Evolución de coeficientes del filtro adaptativo del ruido pirotécnico. Fuente: Elaboración Propia	83
Figura 43: Evolución de MSE del ruido de pirotecnia. Fuente: Elaboración Propia.....	84
Figura 44: Señal de error de cancelación de ruido pirotécnico en función del tiempo. Fuente: Elaboración Propia.	85
Figura 45: Señal de error de cancelación de ruido pirotécnico en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia	86
Figura 46: Cancelación en tiempo (a) y frecuencia (b) de señal de ruido de pirotecnia. Fuente: Elaboración Propia	87
Figura 47: Evolución de coeficientes de filtro adaptativo de ruido licuadora. Fuente: Elaboración Propia	88
Figura 48: Evolución MSE del ruido de licuadora. Fuente: Elaboración Propia.....	89
Figura 49: Señal de error de cancelación de ruido de licuadora en el tiempo. Fuente: Elaboración Propia	89
Figura 50: Señal de error de cancelación de ruido de licuadora en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia	90
Figura 51: Cancelación en tiempo (a) y frecuencia (b) de señal de ruido de licuadora. Fuente: Elaboración Propia.	91
Figura 52: Evolución de coeficientes del filtro adaptativo de ruido golpe de puerta. Fuente: Elaboración Propia.....	92
Figura 53: Evolución de MSE para ruido golpe de puerta. Fuente: Elaboración Propia.	92

Figura 54: Señal de error de cancelación de ruido de golpe de puerta en función del tiempo. Fuente: Elaboración Propia	93
Figura 55: Señal de error de cancelación de ruido de golpe de puerta en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia.....	94
Figura 56: Cancelación en tiempo (a) y frecuencia (b) de señal de ruido de golpe de puerta. Fuente: Elaboración Propia.....	95
Figura 57: Evolución de coeficientes del filtro adaptativo de ruido de ladridos. Fuente: Elaboración Propia	96
Figura 58: Evolución del MSE en ruido de ladridos. Fuente: Elaboración Propia.....	96
Figura 59: Señal de error de cancelación de ruido de ladridos en función del tiempo. Fuente: Elaboración Propia.	97
Figura 60: Señal de error de cancelación de ruido de ladridos en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia	98
Figura 61: Cancelación en tiempo (a) y frecuencia (b) de señal de ruido de ladridos. Fuente: Elaboración Propia.	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Limites de ruido (dBA) en el Perú según zonas de aplicación...	2
Tabla 2: Niveles de ruido (dBA) en los distritos de Lima y Callao según zonas de aplicación.....	3
Tabla 3. Características y predominio de Hiperacusia.	11
Tabla 4: Tabla de comparación de señales de ruido en el tiempo	61
Tabla 5: Tabla de comparación de señales de ruido en la frecuencia	63
Tabla 6: Tabla comparativa de señales de ruido según análisis de características	67
Tabla 7: Comparativa de sistemas de cancelación Feedforward y Feedback	69
Tabla 8: Comparación de estabilidad de coeficiente de convergencia	78

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En la actualidad, el ruido ambiental afecta significativamente la calidad de vida y puede generar malestar psicológico en personas expuestas de manera continua. Por esta razón, los sistemas de cancelación activa de ruido resultan esenciales para individuos con sensibilidad auditiva, como aquellos que padecen Trastorno del Espectro Autista (TEA). Este trabajo de investigación se centra en mitigar cuatro tipos de ruidos perturbadores: pirotecnia, motor de licuadora, golpe de puerta y ladridos de perros, los cuales impactan el sistema auditivo de estos individuos en su entorno doméstico. Mediante un análisis detallado y una evaluación gráfica, se determinó el tipo de sistema de cancelación de ruido activo más adecuado para su desarrollo. En este estudio se implementó un sistema de control Feedforward que emplea el algoritmo adaptativo FxLMS, utilizando rutas de propagación acústicas obtenidas de una base de datos para ajustar el sistema en auriculares in-ear Bose QC20, logrando una cancelación significativa de las cuatro señales de ruido en función del tiempo y frecuencia.

1.2 Descripción del problema

En la vida cotidiana es común encontrar contaminación acústica que afecta el estilo de vida de las personas, tanto en el bullicio de la ciudad como en el propio hogar. Este ruido es una fuente significativa de problemas en la salud y bienestar, generando desorden a nivel mundial. Este impacto afecta particularmente a personas con Trastorno del Espectro Autista (TEA), quienes, en su mayoría, presentan una marcada

hipersensibilidad auditiva (Urizar-Sánchez et al., 2022), lo que los vuelve especialmente vulnerable al ruido. Aunque en el hogar la exposición al ruido puede reducirse, aún existen fuentes de ruido doméstico que alteren la tranquilidad y pueden provocar situaciones de malestar, afectando de manera significativa la tranquilidad de las personas con TEA. Además, la falta de estrategias efectivas de control de ruido no solo interfiere con su bienestar, sino que también puede contribuir al deterioro de la salud auditiva de los individuos que presentan esta condición (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), 2016).

En el caso de las personas con TEA, presentan una hipersensibilidad auditiva marcada que afecta su percepción de ruido (Danesh et al., 2021); así mismo, las experiencias sensoriales intensas pueden llegar a lastimar los oídos de las personas que lo padecen (Jones et al., 2003). Además, existen normativas que regulan los niveles de ruido permitidos a nivel nacional, tales como el Decreto Supremo N° 085-2003-PCM, que establece límites permisibles de nivel de ruido en distintas áreas del territorio peruano, clasificados en cuatro zonas y aplicado en dos horarios que son mostrados en la Tabla 1 (PCM, 2003).

Tabla 1

Límites de ruido (dBA) en el Perú según zonas de aplicación

ZONA DE APLICACIÓN	VALORES EXPRESADOS dBA	
	HORARIO DIURNO (07 am a 22 pm)	HORARIO NOCTURNO (22pm a 07am)
ZONA DE PROTECCIÓN ESPECIAL	50	40
ZONA RESIDENCIAL	60	50
ZONA COMERCIAL	70	60
ZONA INDUSTRIAL	80	70

Nota. En la tabla se muestra como la cantidad de ruido permitido en el Perú cambia durante el día y la noche, además de variar según el tipo de zona de aplicación. Fuente: (PCM, 2003)

No obstante, la OEFA detectó en el año 2016 altos niveles de ruido en la ciudad de Lima según distrito y zona de aplicación, donde se observan ruidos mayores al permitido por el Decreto Supremo, tal como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2

Niveles de ruido (dBA) en los distritos de Lima y Callao según zonas de aplicación.

Nº	DISTRITO	ZONA DE APLICACIÓN	dBA
1	El Agustino	Comercial	84.9
2	Santiago de Surco	Protección Especial	84.5
3	Ate	Comercial	84.3
4	San Martín de Porres	Comercial	83
5	Lurigancho - Chosica	Comercial	82.7
6	El Agustino 2	Comercial	82.3
7	Carabayllo	Comercial	82.2
8	San Juan de Miraflores	Comercial	81.9
9	Santiago de Surco	Comercial	81.8
10	Breña	ZTE	81.6

Nota. La tabla muestra los niveles ruido en dBA según distrito y zona de aplicación.
Fuente: (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), 2016)

Estos niveles de ruido superan ampliamente los límites establecidos por el Decreto Supremo, resultandos perjudiciales para la salud de personas con alta sensibilidad auditiva, como las personas que presentan Trastorno de Espectro Autista. Además, el ruido no solo afecta a las personas con TEA en zonas urbanas o comerciales, sino que también está presente en entornos domésticos, generado por los ruidos de electrodomésticos, reparaciones hogareñas, ladrido de perros, etc.

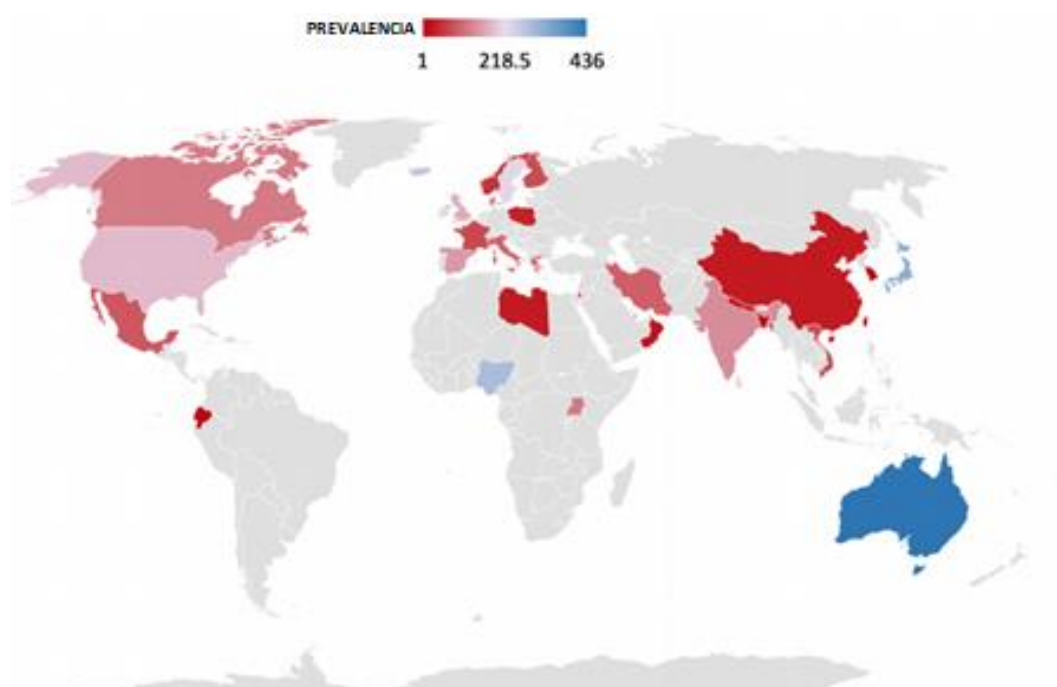
1.3 Definición del problema

A nivel mundial, aproximadamente 1 de cada 100 niños es diagnosticado con Trastorno del Espectro Autista (Zeidan et al., 2022). La mayoría de estos individuos

presenta una condición auditiva conocida como hiperacusia, que implica una mayor sensibilidad al sonido con un umbral de tolerancia más bajo, lo que facilita la percepción de ruidos intensos y genere problemas auditivos a futuro en las personas con TEA. En la Figura 1 se muestra la prevalencia de autismo en los seis continentes entre los años 2012 y 2021, donde se indica la cantidad de personas que padecen este trastorno por cada 10,000 personas a nivel mundial.

Figura 1

Prevalencia de autismo por cada 10000 personas de 2012 a 2021.

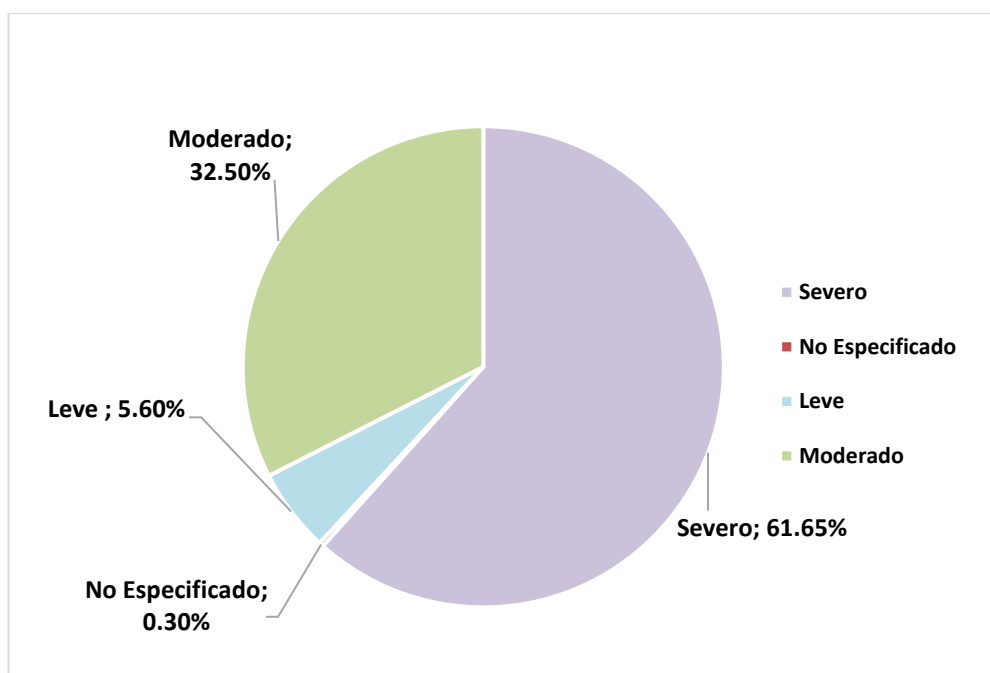


Nota. El gráfico muestra la distribución de personas con autismo entre el año 2012 al 2021. Fuente: (Zeidan et al., 2022).

Así mismo, según la clasificación de severidad del trastorno en la población peruana, se observa un registro de 16 105 personas diagnosticados con el Trastorno de Espectro Autista (TEA) que fueron ingresadas en el Registro Nacional de Personas con Discapacidad (CONADIS, 2019), siendo este un alto índice de personas con TEA con una clasificación moderada y severa en comparación al leve y no especificado, tal como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Población con diagnóstico TEA inscrita en CONADIS por nivel de gravedad del año 2000 al 2018.



Nota. El gráfico muestra la distribución de severidad de personas con TEA inscritas en el Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad. Fuente: (CONADIS, 2019)

Por otro lado, es importante destacar que estas personas carecen de un sistema eficaz de filtración de ruido debido a su hipersensibilidad y la exposición constante a altos niveles de ruido. Además, esta necesidad aborda el uso de un método de control de ruido para prevenir problemas de salud. En el presente trabajo de investigación, se diseñó un sistema activo de control de ruido que atienda esta carencia, con el objetivo de atenuar los sonidos de cuatro ruidos domésticos y mejorar la respuesta auditiva en los individuos.

1.4 Formulación del problema

Por lo tanto, en base a lo expuesto se formulan las siguientes preguntas de investigación:

1.4.1 Problema general

¿Cómo diseñar un sistema de cancelación de ruidos domésticos en auriculares usando el algoritmo FxLMS para personas con Trastorno del Espectro Autista (TEA)?

1.4.2 Problemas específicos

¿Cuáles son las características del ruido doméstico (tiempo y frecuencia) del diseño del sistema de cancelación de ruido?

¿Cuál es el modelo del sistema de cancelación de ruido en auriculares en función a la selección y distribución de micrófonos, tipo de ruido y procesamiento del sistema?

¿Cómo diseñar y simular el sistema de cancelación de ruido en función del coeficiente de convergencia para los cuatro tipos de ruidos domésticos usando el algoritmo FxLMS para personas con TEA?

1.5 Delimitación del proyecto

Este proyecto tiene como objetivo diseñar y simular un sistema de cancelación de ruidos domésticos en un auricular in ear utilizando el algoritmo de cancelación FxLMS para personas con TEA.

El desarrollo del proyecto se plantea ser realizado en 3 fases: Determinar las características de ruido, modelar un sistema de cancelación de ruido usando el algoritmo FxLMS en auriculares in ear, y simular el sistema de cancelación de ruidos domésticos para evaluar su efectividad en personas con TEA.

1.6 Objetivos

1.6.1 *Objetivo general*

Diseñar un modelo de sistema de cancelación de ruidos domésticos usando el algoritmo FxLMS para personas con Espectro Autista (TEA) en auriculares.

1.6.2 *Objetivos específicos*

- OE1: Determinar las características del ruido doméstico (tiempo y frecuencia) del diseño del sistema de cancelación de ruido.
- OE2: Modelar un sistema de cancelación de ruidos en auriculares en función a la selección y distribución de micrófonos, tipo de ruido y procesamiento del sistema.
- OE3: Diseñar y simular el sistema de cancelación de ruidos domésticos en función al coeficiente de convergencia usando el algoritmo FxLMS para personas con TEA.

1.7 Organización de la tesis

En el capítulo 1 se expone la definición y descripción del problema a abordar en la presente investigación, junto con los objetivos planteados en el diseño del sistema de cancelación de ruidos domésticos ambientales con el algoritmo FxLMS para personas con TEA. El capítulo 2 expone las bases teóricas que sustenta esta investigación, además de los antecedentes de investigación que avalan el desarrollo de esta tesis. En el capítulo 3 se describe la metodología empleada, donde se determinó el tipo de investigación realizada y variables de investigación. A consecuencia de ello en el capítulo 4 se presenta el desarrollo de la investigación mediante el desarrollo funcional del sistema, el diseño de software mediante modelamiento en Matlab, así como las pruebas realizadas mediante simulación. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos por el desarrollo del proyecto, así como la discusión de estos. Finalmente, el capítulo 6 incluye las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones relacionada a la tesis culminada.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 *Trastorno del Espectro Autista*

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define los Trastornos del Espectro Autista (TEA) como un grupo complejo de trastornos del desarrollo cerebral que afectan principalmente la comunicación, la interacción social y el comportamiento. Este trastorno presenta una amplia gama de síntomas y niveles de gravedad, lo cual ha llevado a su clasificación en un espectro. Existen 5 diagnósticos específicos dentro del Trastorno de Espectro Autista (Ozonoff, 2003):

- Trastorno Autista
- Trastorno de Asperger
- Trastorno de Rett
- Trastorno Desintegrativo Infantil
- Trastorno Generalizado del Desarrollo No Especificado.

Las personas con TEA a menudo presentan limitaciones en áreas como la comunicación, habilidades cognitivas, respuestas sensoriales y comportamientos sociales. Entre las principales dificultades se encuentran (Ozonoff, 2003):

- **Patrones de comportamiento repetitivos**

Esta conducta particular de las personas con TEA puede incluir un fuerte e inusual interés en actividades que son difíciles de desprender, tales como:

Movimientos motores repetitivos del cuerpo, apego a rutinas estrictas y enojo al menor cambio de rutina, intereses intensos y específicos en ciertos temas.

- **Dificultad en relaciones sociales**

Esta conducta presenta una dificultad constante en la comunicación no verbal en las interacciones sociales, tales como: Contacto visual, expresión facial, gestualidad, y movimientos corporales inusuales. De igual manera, dificultad de desarrollar interacciones sociales con personas de su edad y algunos miembros de su familia, poco interés en otras personas de su entorno.

- **Dificultad en la comunicación**

Entre una de las características principales que poseen las personas con TEA es una deficiencia en la comunicación verbal, tales como: Retraso del lenguaje oral al no conjugar frases completas o simples frases, dificultad continua en mantener o iniciar una conversación, uso repetitivo y/o déficit en la articulación de palabras, así como la repetición de palabras que escucha de otras personas.

- **Hipersensibilidad.**

La estructura cerebral de las personas con TEA presenta anormalidades en el cerebro, especialmente en una región específica del encéfalo llamada cerebelo, en esta región se ven afectados los procesos sensoriales, funciones motoras, funciones cognitivas y de atención; esto provoca una dificultad severa en la persona que sufre este trastorno, principalmente en los procesos de modulación y discriminación sensorial (Kranowitz, 2005).

De manera que los niños con autismo presentan patrones únicos en sus procesos sensoriales, además de grandes habilidades en determinadas percepciones, tales como: Una excelente vista, buena capacidad olfativa, hiperacusia, etc. Sin embargo, esta hipersensibilidad que presenta la persona con TEA no es constante en todo su sistema fisiológico sensitivo, manifestando una disminución severa de otros sentidos en compensación a esta hipersensibilidad (Kranowitz, 2005).

Uno de los principales problemas actuales de hipersensibilidad que sufren en su gran mayoría las personas con Trastorno del Espectro Autista es la sobreexcitación del sistema auditivo, denominado hiperacusia.

- **Hiperacusia (sensibilidad al sonido)**

La sensibilidad al sonido o también llamada hiperacusia es un síntoma de una condición de procesamiento auditivo a nivel neuronal que provoca al individuo una reacción exagerada a los sonidos cotidianos en el día a día. Esta puede ser causada por diversos factores, como: traumatismos, lesiones, enfermedades, trastornos neurológicos, etc. (Heller, 2003). En el caso de los individuos con TEA, la hiperacusia es bastante común en su gran mayoría, y no todos los individuos con este trastorno la experimentan, pero en caso de que la persona sea diagnosticada con TEA es muy posible que presente una sensibilidad extrema a los sonidos habituales, causando gran malestar y provocar respuestas emocionales fuertes dependiendo del grado neurobiológico al que se encuentra diagnosticado.

El estudio realizado por (Danesh et al., 2021) encontró que para pacientes con escucha normal y sin hiperacusia presentan una tolerancia alrededor de los 100 dB de Niveles de Incomodidad de Ruido (NIR); sin embargo, para personas con hiperacusia se reportaron valores NIR entre los 60 dB y 85 dB, denotando que un valor por debajo de 77 dB de nivel de escucha, que debería ser indicativo de presencia de hiperacusia. En el caso de padecerlo, los especialistas recomiendan reducir el estrés en el ambiente, acondicionamiento acústico en sala o el uso de protectores auditivos (Heller, 2003).

Además, (Bonnell et al., 2003) en su investigación con dos grupos de estudio sin ninguna formación musical: el primero con 12 individuos de desarrollo sensitivo normal y el segundo grupo de 12 personas con TEA, se pusieron a prueba la detección de señales audibles mediante tonos puros melódicos. Revelando que las personas con autismo tenían una capacidad de diferenciación de tono mucho mayor que los individuos del otro grupo, confirmando que las personas con TEA presentan un rendimiento superior en el procesamiento sensorial auditivo.

El artículo (Danesh et al., 2021), describió la relación entre los trastornos de tolerancia a los sonidos de la población con Trastorno del Espectro Autista, según, la severidad del trastorno en el individuo. El estudio brinda información sobre la prevalencia de hiperacusia a nivel general en 3.2 a 17.1% de la población mundial, además de dar a conocer la evaluación, prevención y tratamientos de la hiperacusia en personas con TEA. Así mismo brinda información del origen neuronal o biológico de este padecimiento, que responde con mayor notoriedad a sonidos con menor intensidad para las personas que lo padecen. El artículo concluye afirmando que el crecimiento y cambio continuo de estos análisis de hiperacusia cambian a través del tiempo. En la Tabla 3 se observa una recopilación de estudios realizados sobre la prevalencia de hiperacusia en la población con TEA, así como la comparación con participantes con cualidades generales, mostrando que estos porcentajes son el doble comparado con la población de individuos generales.

Tabla 3

Características y predominio de Hiperacusia.

Investigaciones	Participantes	Edad	Severidad de TEA	Herramienta para evaluar Hiperacusia	%Hiperacusia
(Rimland & Edelson, 1995)	17 (11 hombres y 6 mujeres)	4 - 21	No Específica	Cuestionario de Sensibilidad Auditiva entregado a padres	Leve - 53% Moderado - 24% Fuerte - 18%
(Rosenhall et al., 1999)	199 (153 hombres y 46 mujeres)	Niños Adolescentes	Autismo	No Específica	18%
(Demopoulos & Lewine, 2015)	60 (48 hombres y 12 mujeres)	5 - 18	Alto - Bajo Funcionamiento	No Específica	37%
(Danesh et al., 2015)	55 (46 hombres y 9 mujeres)	4 - 42	Alto Funcionamiento (Asperger)	Cuestionario de Hiperacusia	69%

Nota. La tabla muestra investigaciones sobre hiperacusia según participantes, edad, severidad de TEA, herramientas utilizadas y porcentaje de hiperacusia presente. Fuente: (Danesh et al., 2021)

2.1.2 *Procesamiento de señales*

Es definida como una disciplina que se centra en la manipulación y análisis de señales digitales. Esta disciplina mejora la calidad del sonido y la imagen de un sistema digital hasta la extracción de información de señales. Todo ello implica el uso de algoritmos y métodos matemáticos para analizar y modificar las señales que han sido digitalizadas. Estas señales pueden provenir de diversas fuentes analógicas y son tratadas haciendo uso de un convertidor analógico a digital. El procesamiento digital de señales es empleado en diversas aplicaciones, entre ellos: audio, imagen, video, telecomunicaciones, medicina, sensores y diversas aplicaciones más (Gazi, 2018).

- **Conversión Analógica a Digital**

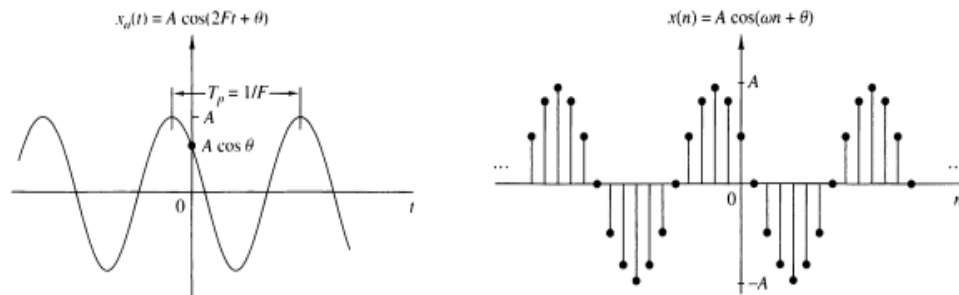
Es un procedimiento muy importante en el procesamiento digital de señales, ya que permite transformar señales analógicas de manera continua a señales discretas en puntos específicos en el tiempo para su posterior procesamiento y control mediante algoritmos digitales (Gazi, 2018). Entre los principales elementos que componen esta técnica, se encuentran los siguientes:

- a) Muestreo**

Es el proceso mediante el cual se obtiene valores discretos de una señal continua analógica en el tiempo (Zolzer, 2008), este proceso se realiza mediante una cantidad de muestras por segundo (frecuencia de muestreo) tomadas de una señal analógica, todo ello para poder representarla en un formato discreto con valores numéricos enteros y ser capaz de digitalizar para realizar procesos de filtrado, amplificado, atenuación, y distintos procesos a una señal digitalizada. Esta señal es mostrada en la Figura 3, donde se observa una señal sinusoidal (coseno) que es muestreada con una determinada frecuencia de muestreo para su reconstrucción y mantener las propiedades como la amplitud, fase y frecuencia.

Figura 3

Formato discreto de una señal sinusoidal muestreada.



Nota. El gráfico muestra la discretización de una señal sinusoidal con una amplitud A y función coseno. Fuente: (Proakis & Manolakis, 1996).

b) Aliasing:

Es un efecto no deseado que ocurre al muestrear una señal analógica con una frecuencia de muestreo demasiado baja, provocando problemas en la reconstrucción de la onda de manera digital, causando distorsiones y creación de información no deseada que puede provocar lecturas erradas de nuestro proceso de digitalización (Kahrs, 2002).

c) Teorema de Nyquist:

El teorema de Nyquist es un principio del procesamiento de señales que determina condiciones determinadas para muestrear y reconstruir una señal analógica sin pérdida de información de esta señal ya digitalizada. Esta expone que una frecuencia de muestreo establecida, debe ser como mínimo el doble de la frecuencia más alta conocida de una señal analógica (Gazi, 2018).

$$F_s \geq 2 \cdot (F. \text{máx. de señal analizada}) \quad (1)$$

Donde:

F_s : Frecuencia de muestreo

$F. \text{máx.}$: Frecuencia máx. de la señal a muestrear

d) Cuantización

Es el proceso de transformar una señal de amplitud continua en el tiempo muestreada en una señal digital (Zolzer, 2008). Permite definir la cantidad de niveles digitales de cuantización necesaria para determinar la resolución más alta con la que se trabajan estas señales como se observa en la Figura 4. Mientras el error de cuantificación es mucho menor, se obtiene una mejor lectura y se define en mejor resolución de la señal cuantificada para transmitirla, almacenarla y procesarla para su correcto manejo y transporte hacia otros procesos efectivos (Gazi, 2018). Comúnmente se expresa en bits:

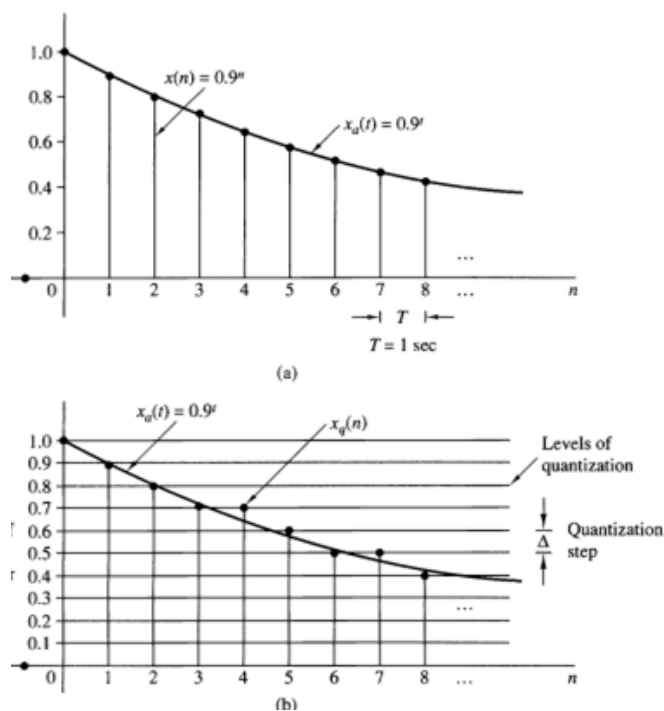
8 bits: Usado en audio de baja calidad (2^8 niveles de cuantización)

16 bits: Usado en audio estándar (2^{16} niveles de cuantización)

24 bits: Usado en grabación profesional, formato sin pérdida de audio (2^{24} niveles de cuantización)

Figura 4

Proceso de niveles de cuantificación de una señal



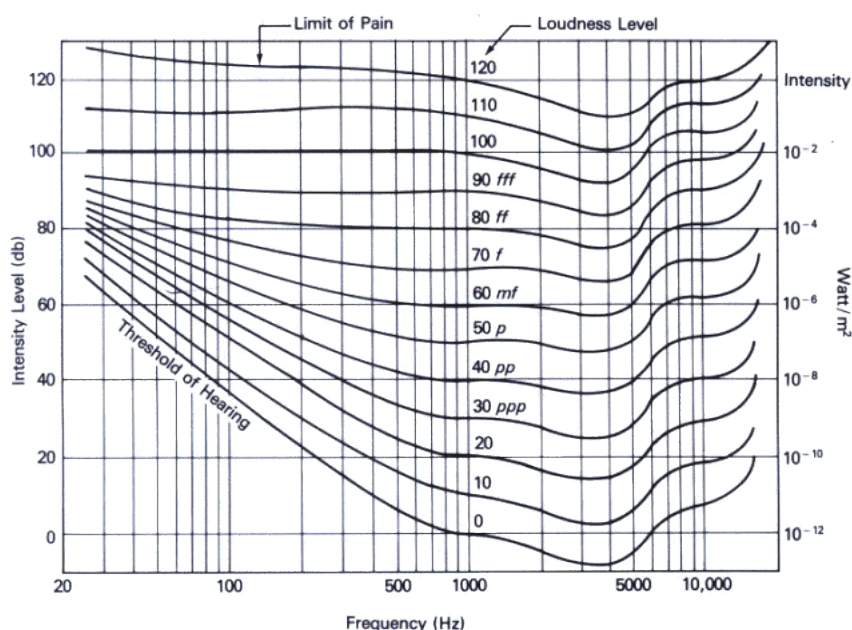
Nota. El gráfico mostrado explica la cantidad de pasos de cuantización y niveles de procesamiento de digitalización de una señal. Fuente: (Kahrs, 2002).

2.1.3 Percepción del sonido ante estímulos acústicos

La acústica es una rama de la física que se encarga del estudio de presión sonora en el ambiente, a medida que estas ondas sonoras viajan, los humanos tienden a percibir las a través del oído, este sistema auditivo es capaz de percibir frecuencias acústicas en el rango de 20 a 20000 Hz (Bregman, 1990) , y una de las características principales es su capacidad de percepción logarítmica mediante curvas representativas de umbrales de audición como se puede apreciar en la Figura 5, donde se observa una máxima sensibilidad en la banda de 1000 Hz a 5000 Hz, estas curvas representan cómo escuchamos logarítmicamente las frecuencias graves, medias y agudas (Merino & Muñoz-Repiso, 2013).

Figura 5

Curvas de ponderación auditiva.



Nota. El gráfico representa la respuesta auditiva del ser humano y la percepción sonora. Fuente: (Merino & Muñoz-Repiso, 2013).

2.1.4 Ruido

Es un conjunto de sonidos que se propagan a través de un medio elástico a una velocidad intrínseca a ese material. Los niveles de ruido en general continúan

en aumento a través del tiempo y los niveles promedio de ruido en las ciudades y las casas han aumentado aproximadamente un decibel por año durante los últimos treinta años. El nivel de presión sonora representa la magnitud del ruido y es una de las características que pueden verificar si un ruido determinado está por encima de su "nivel de contaminación". Así mismo, el ruido posee las siguientes características: Contenido frecuencial, duración, presencia de tonos puros, variabilidad sonora y contenido informativo (Lawrence K. & Norman C., 1979).

Entre los tipos de ruido según su **respuesta en frecuencia** se encuentran los siguientes:

- **Ruido de banda ancha**

El ruido de banda ancha hace referencia a un ruido que tiene un espectro de frecuencia amplio y continuo, abarcando una amplia gama de frecuencias, esta es percibida como un sonido constante sin un tono en específico en todo el espectro de frecuencias. No se concentra en una frecuencia específica, tales como: El bullicio, el ruido del tráfico, el ruido de la lluvia, y el ruido de fondo en una conversación, todos ellos ocupan muchas frecuencias simultáneamente con energía distribuida en su gran mayoría en un espectro amplio de frecuencias (Murphy & King, 2014).

- **Ruido de banda limitada o tonal**

El ruido de banda limitada o tonal se refiere al ruido caracterizado en una o más frecuencias predominantes en un determinado rango, estos tonos suelen ser identificables como picos distintos en un espectro de frecuencia, además de ello, se caracteriza por presentar energía en un rango de frecuencias muy estrecho que es más prominente que otras. Esta puede ser producido por maquinas giratorias, aire acondicionado, zumbidos motores, etc. Esto produce que la percepción del ruido llegue a ser molesta debido a la calidad penetrante de tonos en un determinado ancho de banda (Murphy & King, 2014).

Con respecto a su naturaleza y **características temporales** se encuentran los siguientes:

- **Ruido impulsivo**

Este tipo de ruido se caracteriza por ser de aparición súbita y de corta duración, cuyo pulso de duración es muy pequeño, pero con un alto nivel de energía en con respecto a la duración de la señal, además de ser rápidos e impredecibles, presenta características no periódicas debido a que no se presenta a intervalos regulares de tiempo (Sicong, 2021); al ser extremadamente altos en un breve periodo de tiempo, no permite la adaptación del oído gradual internamente, provocando problemas cardiovasculares. Entre ellos se encuentran: Ruido de puerta al cerrarse de golpe, ruido de un martillo, ladrido de canes, ruido de disparos, sonido que emite un rayo, etc.

- **Ruido continuo**

Este tipo de ruido se encuentra presente en el tiempo de manera constante o con pequeñas fluctuaciones e intensidad relativamente estable en un tiempo determinado, se caracteriza por ser predecible y sin pausas significativas (Norton & Karczub, 2007). Posee componentes periódicos que generan un sonido que puede llegar a ser agotador y monótono, provocando una sensación de fatiga auditiva y estrés continuo. Entre ellos se encuentran los ventiladores, aire acondicionado, electrodomésticos, etc.

2.1.4.1 *Ruidos domésticos*

En una vivienda, el ruido doméstico se genera tanto en su interior como en sus alrededores, y es percibido como molesto o perturbador. Estos ruidos provienen de actividades cotidianas en el hogar, así como perturbaciones externas que se perciben en su interior. Entre los ruidos más comunes se encuentran los producidos por electrodomésticos, obras de reforma, aire acondicionado, calefacción, transformadores, gritos, ruidos del vecindario, mascotas, entre otros (Requena, 2004). Estos tipos de ruido originan una respuesta característica de miedo en las personas con TEA, debido a la sensibilidad auditiva a ruidos cotidianos en el hogar (Narambuena et al., 2022)

El ruido proveniente del vecindario, además de afectar el interior de una vivienda, se puede originar de manera externa como en locales de eventos, bullicio, ladrido de perros, fuegos artificiales, juegos recreativos, etc. Todos estos factores generan malestares y efectos adversos en la salud, especialmente en la audición, a su vez este presenta un impacto significativo en la banda frecuencial de 3000 a 6000 Hz, siendo la frecuencia de 4000 Hz la más dañina (OMS, 1999).

2.1.5 *Técnicas de reducción de ruido*

2.1.5.1 *Cancelación de ruido pasivo*

Este tipo de cancelación de ruido funciona con estrategias acústicas en el uso de materiales de propiedad absorbente o reflectante del ruido acústico, que evitan el ingreso de ruido a una determinada zona o canal auditivo de las personas (Pierce, 1992). Estas técnicas de cancelación de ruido pasiva utilizan materiales como barreras físicas que bloquean o atenúan las ondas sonoras, como: orejeras con aislamiento externo, paneles acústicos, alfombras gruesas o cortinas de gran anchura como el uso de puertas insonorizadas.

Este tipo de cancelación es mucho más efectiva para frecuencias medias y altas, pero con menor efectividad para frecuencias bajas como el sonido de golpes, motores o explosiones (Pierce, 1992).

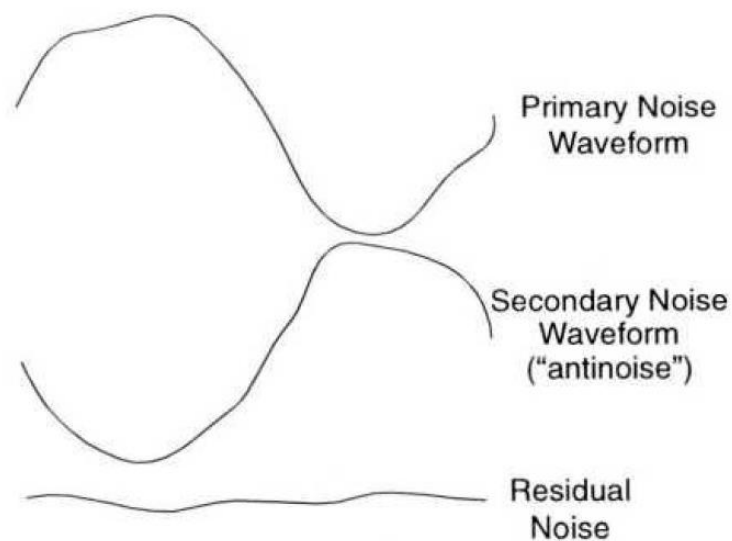
2.1.5.2 *Cancelación de ruido activo*

El Sistema de Cancelación de Ruido Activa o Active Noise Cancelling (ANC) es un sistema de control que se encuentra diseñado para reducir o eliminar una señal de ruido no deseado en un entorno determinado (Hansen & Scott Snyder, 2012). Este sistema hace uso de micrófonos que detectan el ruido del ambiente a eliminar, este ruido es analizado por algoritmos matemáticos, que al detectar las frecuencias específicas que producen una mayor contaminación en la

información captada generan ondas de sonido con una polaridad inversa que cancela el ruido percibido antes que llegue a los oídos del individuo, tal como se observa en la Figura 6. Además de resultar muy efectivo con una reducción considerable en frecuencias medias y bajas; para cancelación activa de ruido acústicos es mayormente utilizado y con un desempeño óptimo para frecuencias graves por debajo de los 500 Hz (Kuo & Morgan, 1996).

Figura 6

Concepto físico de cancelación activa de ruido.



Nota. El gráfico muestra el proceso de cancelación de una señal con una inversión polarizada de la misma. Fuente: (Kuo & Morgan, 1996)

Entre los dos tipos de control más utilizados en el diseño de este sistema de cancelación de ruido activo se encuentra:

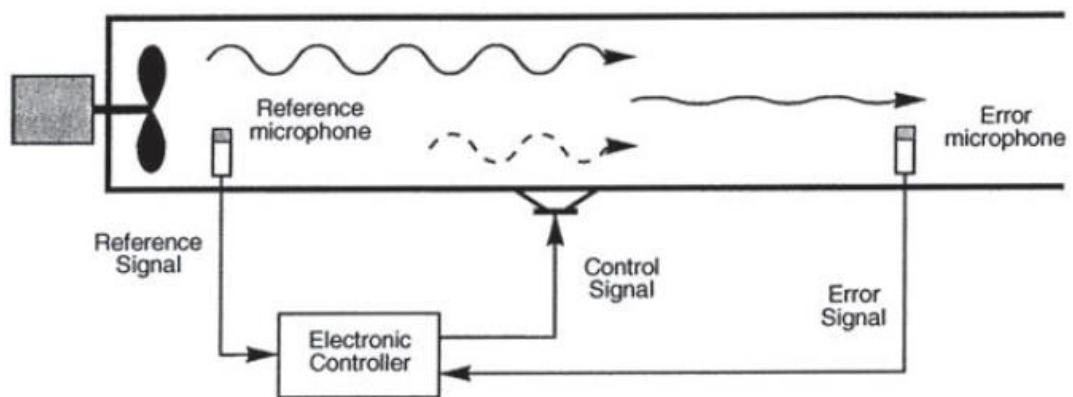
a) Control adaptativo FeedForward de ruido activo

Es uno de los tipos de control más comunes, consiste en utilizar un transductor como medida de referencia, una fuente de control, un transductor como medida de error y un algoritmo de control como se muestra en la Figura 7. El controlador consiste en un filtro adaptativo digital y un algoritmo adaptativo que establece los valores en el diseño. Para este tipo de control el micrófono de referencia muestrea una señal entrante que es filtrada por un controlador

electrónico para producir una señal de salida hacia una fuente de control, que en estos casos de cancelación de ruido son las bocinas. El desempeño del controlador se mide mediante el micrófono de error, que proporciona una señal hacia el sistema para que el algoritmo de control la utilice y ajuste la salida del controlador (bocina física), de manera que la presión sonora en el micrófono de error se minimice y el desempeño del diseño sea el óptimo para el control activo (H. Hansen, 2001).

Figura 7

Diagrama de control de ruido FeedForward.



Nota. El gráfico muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de ruido activo Feedforward. Fuente: (H. Hansen, 2001).

Entre los tipos de sistemas de cancelación de ruido activo Feedforward en base al espectro de frecuencias a desempeñar el proceso de cancelación se encuentran los siguientes:

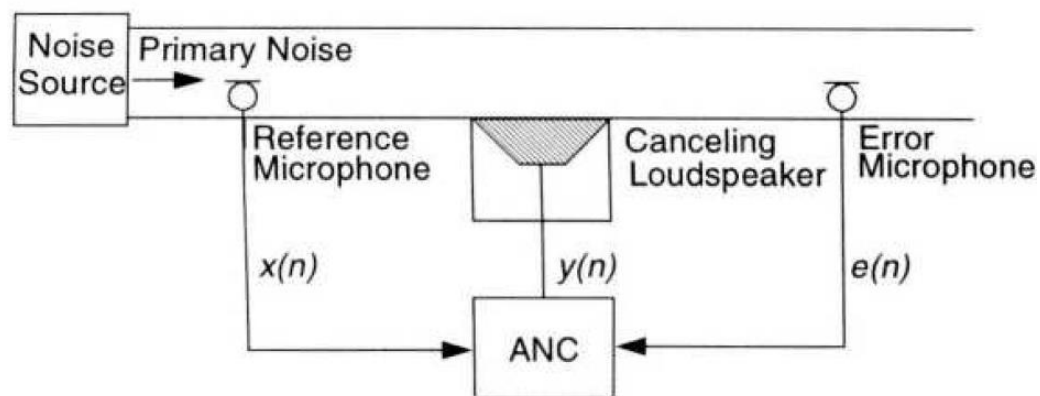
- **Sistema Feedforward de Banda Ancha (Broadband Feedforward)**

Es utilizado comúnmente en el control de ruido acústico broadband, hace uso de una señal de ruido adquirida y detectada por un micrófono de referencia cerca de la fuente original, permitiendo que el sistema genere una señal de cancelación que produzca una señal secundaria con una fase similar de 180° del ruido captado con el objetivo de disminuir la señal por medio de la señal antiruido incorporada. El

rango de frecuencia de funcionamiento del sistema depende exclusivamente de la respuesta frecuencial del camino de propagación del ruido ingresado, definiendo así los límites del sistema activo por el medio acústico en el que se propaga, un esquema de este tipo de sistema se observa en la Figura 8.

Figura 8

Diagrama de sistema Feedforward de banda ancha para cancelación de ruido.



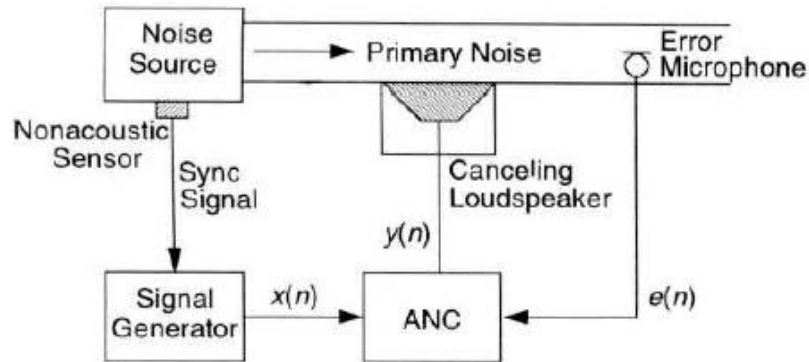
Nota. El gráfico presenta el diagrama de bloques de un sistema de control de ruido activo Feedforward de banda ancha. Fuente: (Kuo & Morgan, 1996)

- **Sistema Feedforward de banda limitada (Narrowband Feedforward)**

El sistema de banda limitada se utiliza comúnmente para el procesamiento de ruido producido por máquinas rotativas, hace uso de sensores de referencia no acústicos como el tacómetro o uso de sensores ópticos con la finalidad de obtener el ruido, así mismo evita que se filtre la señal anti-ruido por un medio acústico producido por el altavoz a la señal de referencia, siendo útil para sistemas de cancelación de ruido que se enfoquen en vibraciones o ruidos periódicos. En la Figura 9 se observa el diagrama de bloques del sistema de cancelación de ruido descrito.

Figura 9

Diagrama de sistema Feedforward de banda limitada para cancelación de ruido.



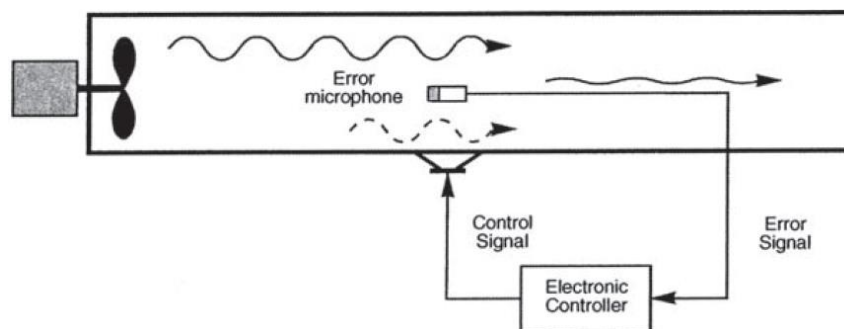
Nota. El gráfico exhibe el diagrama de bloques de un sistema de control de ruido activo Feedforward de banda limitada. Fuente: (Kuo & Morgan, 1996)

b) Control FeedBack de ruido activo

El sistema de control FeedBack se distingue de los sistemas de control FeedForward en el modo de manipulación de la señal de control, tal como se muestra en la Figura 10. Mientras que los sistemas FeedForward se basan en la medida predictiva de la perturbación entrante generando una cancelación adecuada, los sistemas FeedBack buscan atenuar los efectos residuales de la perturbación ya producidas. Por lo tanto, los sistemas Feedforward son mejores para reducir la respuesta transitoria de los sistemas, mientras que los sistemas Feedback son mejores para reducir la respuesta en estado estacionario (H. Hansen, 2001).

Figura 10

Diagrama de control de ruido activo FeedBack.



Nota. El gráfico muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de ruido activo FeedBack. Fuente: (H. Hansen, 2001)

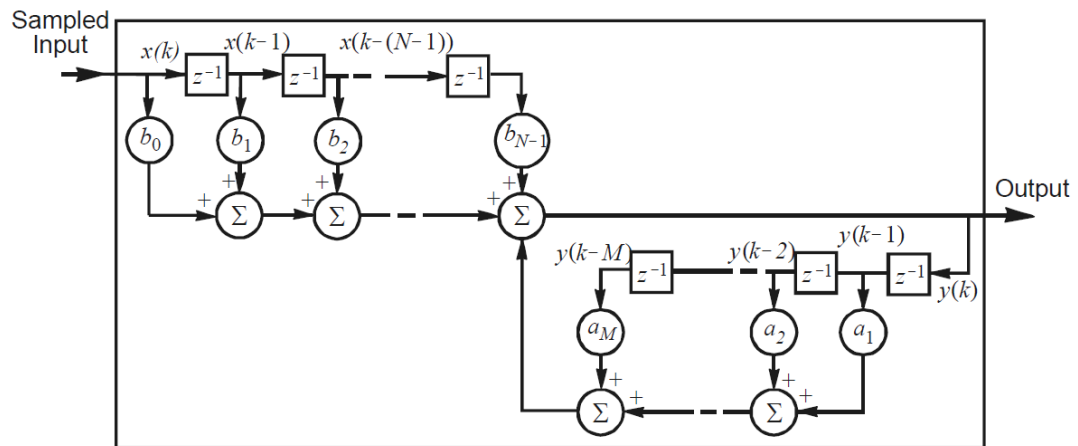
2.1.6 Filtros Adaptativos

- **Filtros IIR**

Son filtros de respuesta infinita al impulso, la respuesta al impulso de este tipo de filtro tiende a ser infinita debido a la retroalimentación de salida del filtro. El diagrama de bloques de funcionamiento del filtro es mostrado en la Figura 11, son llamados también recursivos debido a que no depende solamente de entradas actuales y pasadas, sino también de salidas anteriores a la señal para el diseño de este tipo de filtros (Hansen & Scott Snyder, 2012). Estos tipos de filtros suelen diseñarse a partir de versiones analógicas de filtros clásicos como los filtros Butterworth, Chebyshev, etc.

Figura 11

Diagrama de bloques del filtro de respuesta al impulso infinita (IIR).



Nota. La gráfica muestra el diagrama de bloques del filtro IIR. Fuente: (Hansen & Scott Snyder, 2012)

La siguiente ecuación (2) muestra el comportamiento del filtro IIR para una entrada con un vector $x(k)$ y coeficientes a_n y b_n .

$$y(k) = \sum_{n=0}^M b_n x(k-n) - \sum_{n=1}^N a_n y(k-n) \quad (2)$$

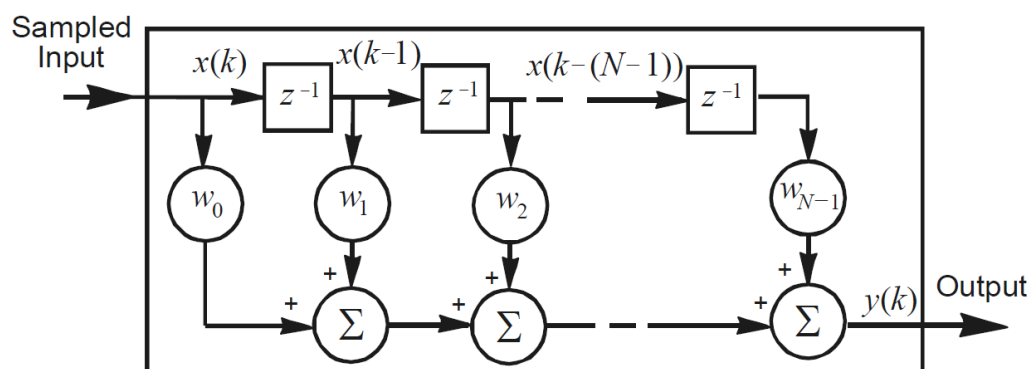
Donde N es la longitud del filtro de alimentación directa y M es la longitud del filtro de la retroalimentación, además a es un vector de dimensión $(N \times 1)$ y b es un vector de dimensión $(M \times 1)$ que contiene los valores de los coeficientes del filtro IIR a lo largo del tiempo.

- **Filtros FIR**

Los Filtros de Respuesta Finita al Impulso (FIR), son un tipo de filtro digital mayormente usados en el procesamiento adaptativo digital de señales, su funcionamiento como se muestra en la Figura 12. A diferencia de los filtros IIR, tiene una respuesta al impulso que brinda estabilidad según la cantidad de coeficientes del filtro, además posee una estructura que llega a ser cero después de un número finito de muestras (Hansen & Scott Snyder, 2012). Esto se debe a que no utilizan retroalimentación en su estructura, lo que garantiza que su respuesta termine después de un tiempo determinado y permita menos espacio de procesamiento y sea una elección práctica.

Figura 12

Diagrama de bloques del filtro de respuesta finita al impulso (FIR).



Nota. La gráfica muestra el diagrama de bloques del filtro FIR modelada mediante una entrada $x(k)$ y coeficientes del filtro w , para un total de N coeficientes que dan lugar a la salida $y(k)$ del filtro FIR. Fuente: (Hansen & Scott Snyder, 2012)

La ecuación (3) muestra el comportamiento del filtro FIR para una entrada con un vector $x(k)$ en un tiempo k :

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n(k)x(k-n) = \mathbf{w}^T(k)\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}^T(k)\mathbf{w}(k) \quad (3)$$

Donde N es la longitud del filtro y $\mathbf{w}$ es un vector de dimensión (N x 1) de los valores de los coeficientes del filtro.

2.1.7 Algoritmos de control Adaptativos

2.1.7.1 Algoritmo LMS

El algoritmo mínimo cuadrático medio (LMS) o también conocido como algoritmo de descenso de gradiente estocástico es un método de optimización utilizado en el procesamiento adaptativo de señales y en el aprendizaje automático cuyo objetivo principal es ajustar los coeficientes de un filtro adaptativo FIR para minimizar el error entre la señal deseada y la señal estimada (Hansen & Scott Snyder, 2012). La estructura del algoritmo se presenta en el diagrama de bloques de la Figura 13.

Requiere conocer una señal de referencia en una cadena de retardos $\mathbf{x}(k)$ y el error resultante con el uso del filtro actual para obtener la señal de salida $e(k)$, se formula siguiendo los siguientes pasos:

- a) Los valores de la cadena de retardos la señal se desplazan un lugar hacia adelante, de manera que todos los valores de la cadena de vectores ingresen constantemente a la ecuación del filtro FIR
- b) Obtener la salida filtrada mediante la multiplicación de los valores de la cadena de retardos por los coeficientes actuales del filtro FIR
- c) Obtener la señal de error por medio de la diferencia entre la salida real del filtro FIR y la salida deseada.
- d) Calcular nuevos valores de los coeficientes FIR utilizando el algoritmo LMS:

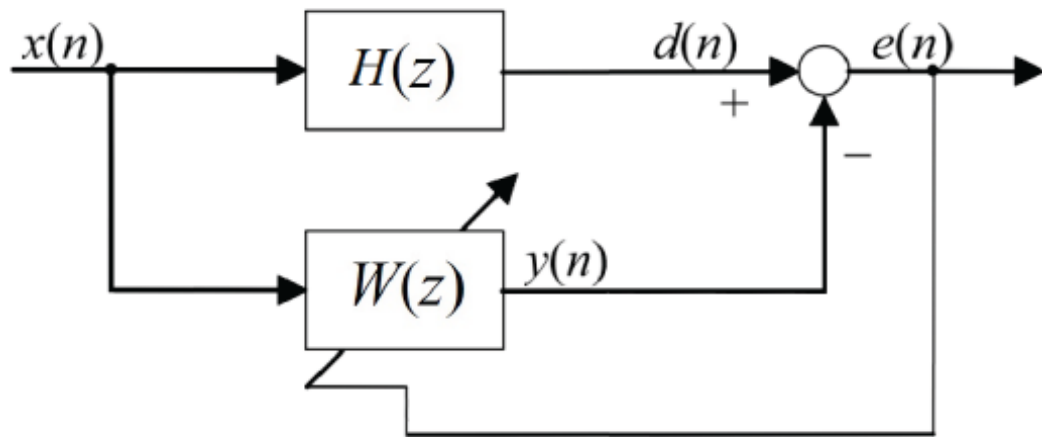
$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \eta e(k)\mathbf{x}(k) \quad (4)$$

- e) Repetir el proceso para mejorar el rendimiento con cada iteración de las muestras de la señal de referencia.

En un sistema de cancelación de ruido, el algoritmo LMS se utiliza para adaptar los coeficientes de un filtro adaptativo de manera que pueda reducir activamente el ruido no deseado en una señal de entrada.

Figura 13

Estructura de un Algoritmo LMS para un coeficiente adaptativo del filtro FIR



Nota. Diagrama de bloques del algoritmo LMS adaptativo. Fuente: (Laita, 2012)

2.1.7.2 Algoritmo LMS normalizado

El algoritmo de mínimos cuadrados medios normalizados o Normalized Least Mean Squares (NLMS) es un algoritmo de filtro adaptativo que mejora el algoritmo LMS básico mejorando su sensibilidad a cambios abruptos presentados en la señal de entrada. El algoritmo NLMS, a diferencia del LMS, ajusta los coeficientes del filtro de manera que normaliza la tasa de aprendizaje, lo que hace que el algoritmo sea más robusto y eficiente, especialmente cuando la señal de entrada tiene amplitudes variables ajustando dinámicamente la señal evitando inestabilidad cuando la energía no es controlada (Hansen & Scott Snyder, 2012).

La tasa de aprendizaje del algoritmo LMS afecta la convergencia y estabilidad, es por ello por ello que en el algoritmo NLMS, esta tasa de aprendizaje se normaliza con respecto a la energía de la señal de entrada. Esta normalización de la señal ayuda a mantener la estabilidad independientemente de los cambios en la entrada y así evita cambios excesivos en los coeficientes del filtro, además mejora su desempeño de aplicaciones en tiempo real (Haykin, 1995). La ecuación (5) se expresa de la siguiente manera:

$$w(k+1)=w(k)+u \frac{e(k)x(k)}{\|x(k)\|^2} \quad (5)$$

Donde:

- **w(k)** es el vector de coeficientes del filtro adaptativo en la iteración k
- **w(k+1)** es el vector de coeficientes actualizado
- **e(k)** es el vector de diferencia entre la señal deseada y la salida del filtro adaptativo
- **x(k)** es el vector de muestras de referencias
- **u** es el coeficiente de convergencia

Se recomienda su uso cuando la entrada $x(k)$ es muy grande y sufre un problema con el coeficiente de convergencia que torna a un valor muy grande y puede llegar a amplificar el ruido y hacer que el algoritmo se vuelva inestable o posea convergencias incorrectas en el proceso de adaptación de la señal (Haykin, 1995).

2.1.7.3 *Algoritmo FxLMS:*

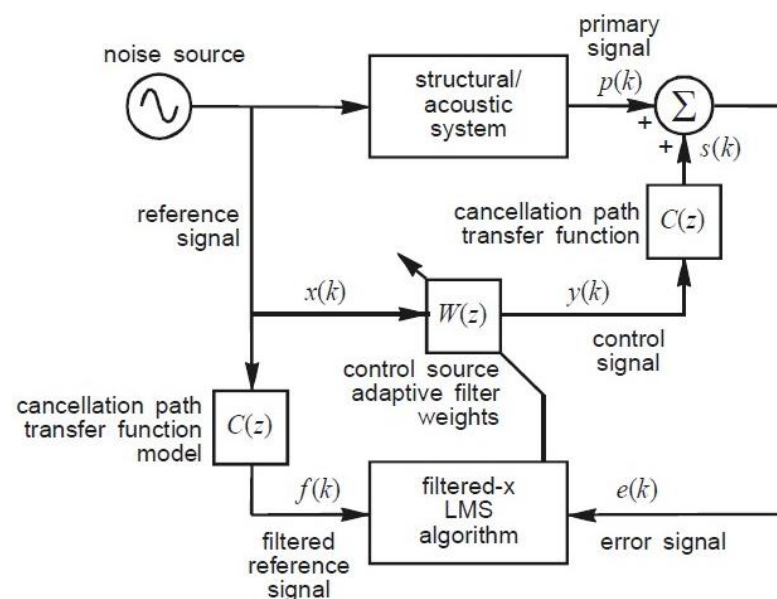
El algoritmo Filtered-x Least Mean Squares (FxLMS) es una modificación del algoritmo LMS. Es utilizado comúnmente en sistemas de cancelación activa de ruido (ANC) con caminos acústicos. Se encuentra diseñado principalmente para lidiar con los efectos de la ruta secundaria, que se define como la función de transferencia entre la señal de anti ruido y el micrófono de error (Qiu et al., 2014).

El algoritmo FxLMS considera las siguientes variables para su óptimo desempeño:

- **Camino primario:** Función de transferencia entre la fuente de ruido y el micrófono de error.
- **Camino secundario:** Representa el sistema electroacústico entre la señal de anti-ruido emitido por un altavoz y el micrófono de error, es muy importante conocer esta ruta debido a que puede llegar a distorsionar la señal anti-ruido antes de que esta llegue al micrófono de error.
- **Señal de referencia de la señal:** A diferencia del algoritmo LMS que utiliza la señal de entrada para procesar el anti-ruido. El FxLMS, hace uso de la señal de referencia a través de un modelo estimado del camino secundario y contempla las posibles distorsiones causadas por esta ruta.
- **Actualización de coeficientes:** Los valores del filtro son actualizados de la misma manera que un algoritmo LMS, sin embargo, la señal de referencia filtrada por el camino secundaria es usada para su actualización.

Figura 14

Diagrama de un sistema adaptativo de control de ruido activo FxLMS Feedforward.



Nota. El gráfico muestra el diagrama de un sistema de control de ruido FxLMS Feedforward. Fuente: (Hansen & Scott Snyder, 2012)

El diagrama del sistema adaptativo de control de ruido de la Figura 14, señala dos etapas, la primera permite derivar un algoritmo adaptativo a los coeficientes del filtro FIR en base a la señal de error y la señal de referencia, y la segunda permite obtener la derivación de la señal de control para la eliminación de la fuente de ruido (Hansen & Scott Snyder, 2012). Para el primer proceso es necesario conocer la referencia de la señal en base a las siguientes ecuaciones:

La medición de la señal del sensor de error $e(k)$ es la suma de la fuente de perturbación $p(k)$ y la fuente de control con polaridad inversa $s(k)$ según la ecuación (7):

$$e(k)=p(k)+s(k) \quad (7)$$

La salida del filtro adaptativo FIR se encuentra definido como la operación de convolución denotada en 3 formas en la ecuación (8):

$$y(k)=\sum_{i=0}^{N-1} w_i(k)x(k-i) = w^T(k)x(k)=x^T(k)w(k) \quad (8)$$

Donde $x(k)$ es el vector de muestras de referencia en la cadena del filtro en un tiempo k , mostrado en la ecuación (9):

$$x(k) = [x(k) \ x(k-1) \ x(k-2) \dots x(k-(N-1))]^T \quad (9)$$

Y se determina que el vector de los coeficientes del filtro $w(k)$ en un determinado tiempo k es definido según la ecuación (10):

$$w(k)=[w_0(k) \ w_1(k) \ w_2(k) \dots w_{(N-1)}(k)]^T \quad (10)$$

La señal de control feedforward $y(k)$ difiere de la señal fuente de control $s(k)$, debido a la implementación de la función de transferencia acústica y a la respuesta característica del sistema que se está controlando.

Al desarrollar este algoritmo adaptativo las funciones de transferencia entre la salida del filtro de control y la salida del sensor de error se pueden combinar

en una sola ruta de cancelación, y ser modeladas en dominio del tiempo resultando así en una sola función de respuesta al impulso finita de orden m en el vector c , ecuación (11):

$$c=[c_0 \ c_1 \dots c_{(m-1)}]^T \quad (11)$$

La fuente de control generada por el componente $s(k)$ de la señal de error es igual a la convolución discreta de la salida del filtro $y(k)$ y la respuesta al impulso del vector c , ecuación (12):

$$s(k)=y(k)*c=\sum_{i=0}^{m-1} y(k-i)c_i=y^T(k)c \quad (12)$$

Donde el vector $y(k)$ es un vector de salida del filtro de control adaptativo de dimensión $(m \times 1)$, queda definido según ecuación (13):

$$y(k)=[y(k) \ y(k-1) \dots y(k-m+1)]^T \quad (13)$$

Además, $X(k)$ es la matriz $(N \times m)$ de la referencia de la señal presente y pasado de las señales iteradas, mostradas en las ecuaciones (14) y (15):

$$X(k)=[x(k) \ x(k-1) \dots x(k-m+1)] \quad (14)$$

$$X(k)=\begin{bmatrix} x(k) & x(k-1) & \dots & x(k-m+1) \\ x(k-1) & x(k-2) & \dots & x(k-m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(k-N+1) & x(k-N) & \dots & x(k-m-N+2) \end{bmatrix} \quad (15)$$

La señal filtrada de referencia $f(k)$ queda definida en la ecuación (16) por la convolución entre la matriz $X(k)$ y el vector c :

$$f(k)=X^T(k) \ c=[f(k) \ f(k-1) \dots f(k-N+1)]^T \quad (16)$$

Donde la iteración ith es igual a la muestra m de la señal de referencia que es utilizado para la generación de la salida del filtro de control.

Además, el algoritmo de gradiente descendiente LMS usado para la adaptación de coeficientes de la fuente de control para el filtro FIR es determinante para

la generación de la señal de ruido filtrada por el camino de propagación secundario, definido en la ecuación (17).

$$w(k+1) = w(k) + ue(k)f(k) \quad (17)$$

El algoritmo FxLMS SISO (Single Input Single Output) constituye el modelamiento de cancelación de ruido para una entrada de micrófono de referencia y una salida de control. Se define en el algoritmo FxLMS:

- **Coefficiente de convergencia (u):**

También conocido como step size. Es un parámetro que mide la velocidad y estabilidad en la que un sistema converge hacia un punto de equilibrio después de una alteración o un cambio en la entrada, determinando así la estabilidad y velocidad del sistema en general. Para efectos prácticos se considera el coeficiente de convergencia entre los valores 0 y 1 donde los valores de step size más cercanos a 0 indican una convergencia más estable pero lenta, y valores cercanos a 1 indican una convergencia voluble y rápida (Snyder, 2000).

- **Error cuadrático medio (MSE):**

En el diseño de un filtro adaptativo FIR, la señal de error $e(k)$ es definida como la diferencia entre el ruido filtrado por el camino primario y la salida de la señal de cancelación, ecuación (18).

$$e(k) = d(k) - y(k) \quad (18)$$

El error cuadrático medio se encuentra definido como el promedio del valor de la señal de error elevada al cuadrado de cada iteración (Hansen & Scott Snyder, 2012) denotando una correcta cancelación si el valor se encuentra lo más cercano a 0 y la tendencia general del error disminuye con el tiempo, se genera una correcta convergencia del modelo, ecuación (19).

$$MSE = E\{e^2(k)\} \quad (19)$$

2.2 Antecedentes del estudio

En la actualidad existen propuestas y soluciones con diversas problemáticas alrededor de todo el mundo. Entre ellas se encuentran las siguientes:

En la investigación de (Reshma & Kiran, 2017), presentaron un diseño de algoritmos de un filtro adaptativo FxLMS con un alto desempeño y bajo nivel de consumo que fue implementado por un FPGA usando programación HDL con simulaciones realizadas en Matlab para atenuar señales de ruido en audífonos in ear, además de ello compararon con el algoritmo LMS que permite controlar el ruido por ancho de banda y de manera periódica pero presenta inestabilidad de control en el sistema por las rutas de propagación, de este modo hace uso del algoritmo FxLMS para mejorar la dinámica de respuesta del sistema ANC en el tiempo, utilizando este último para la implementación del sistema con un FPGA instalado en los auriculares in - ear, mostrando que este diseño reduce muy bien el ruido en varias bandas de frecuencia .

En el estudio realizado por (Lengua Arteaga, 2018), se diseñó e implementó un sistema de control de ruido activo mediante el algoritmo Least Mean Square para solucionar problemas de ruido en procesos industriales, específicamente en motores Diesel y motores eléctricos con niveles de ruido alrededor de los 90 dB. Así mismo, se evaluó el sistema realizado utilizando una grabación del ruido producido por ambos motores y verificó la reducción de ruido en el rango específico de trabajo utilizando filtros adaptativos FxLMS en Matlab con micrófonos que captaban la señal de ruido y bocinas que enviaban la señal polarizada inversamente logrando la cancelación de ruido deseada, atenuando 10dB en motores eléctricos y Diesel entre 200 a 3000 RPM.

En la investigación de (Benois et al., 2019), propone un control FeedForward LMS para el control del sonido por medio de un algoritmo FxLMS en lugar de LMS, aumentando así la velocidad de convergencia y estabilidad de atenuación del sistema como la posición y dirección del micrófono interno utilizando dos cabezas de prueba de sonido con dos canales auditivos. Mostrando como resultado que al pasar los 3KHz de frecuencia se presenta un decaimiento de

atenuación y al sobrepasar los 4Khz de frecuencia no existe una superposición de cancelamiento del sistema debido al posicionamiento del micrófono que no se encuentra próximo al tímpano, es por ello que los autores recomiendan hacer uso de un in-ear para la cancelación correcta del ruido en un entorno acústico cerrado.

En la investigación desarrollada por (Zavaleta Quispe, 2022), se identificó la problemática de ruido ambiental que impedía la comunicación en un centro educativo especial para las personas con TEA, en la provincia de Trujillo, que presentaban una alta sensibilidad auditiva; es por ello, que plantea un desarrollo arquitectónico de aislamiento acústico en los alrededores de la escuela como cancelación pasiva. Al utilizar este acondicionamiento acústico como diseño de control de ruido recurre a un control pasivo del ruido con la finalidad de eliminarlo por medio de materiales aislantes como el corcho aglomerado y vidrio templado, concretando una separación espacial entre los espacios educativos y ruidos externos para el bienestar de las personas con trastorno del espectro autista.

En el estudio de (Bancayan & Viviana, 2020), se discute el problema del uso indiscriminado de pirotécnicos en festividades y cómo afectan estos a personas con TEA en la población peruana, además describió cómo la regulación de la pirotecnia en Perú puede vulnerar los derechos a la salud y la tranquilidad de las personas con trastorno del espectro autista al relacionar el uso de productos pirotécnicos y el impacto negativo que tienen sobre las personas con TEA. Así mismo, analizaron las leyes como la Ley N.º 30299 que regula los ruidos por armas de fuego, municiones, explosivos y productos pirotécnicos. Esta investigación concluye en que la actual regulación de la pirotecnia en Perú no protege adecuadamente a las personas con TEA, ya que los ruidos fuertes pueden desencadenar respuestas extremas como dolor, ansiedad y autolesiones. Es por ello, que sugieren que el Estado implemente medidas adicionales para proteger estos derechos.

En el estudio realizado por (Valentinuzzi, 2018), describió el impacto negativo de los fuegos artificiales en personas con TEA y animales que presentan una percepción audible elevada. En ambos se estudiaron estímulos hipersensoriales

que provocaron respuestas extremas de miedo, ansiedad y dolor. Estos ruidos inesperados de los fuegos artificiales pueden llevar a situaciones peligrosas en una persona con TEA provocando alteraciones traumáticas como ataques de pánico y accidentes al intentar escapar del ruido. El estudio recomienda minimizar la exposición a estímulos auditivos fuertes y desarrollar estrategias que hagan frente a este problema y crear ambientes seguros y controlados para las personas con hipersensibilidad auditiva con a fin de mejorar su bienestar.

En la investigación de (Ceron Corza, 2023) explica los efectos adversos del uso de la pirotecnia en personas con TEA que no se encuentran reguladas en el estado de México. Evaluó el grado de hipersensibilidad auditiva que padecen las personas que sufren trastorno autista por efecto de los ruidos excesivamente fuertes como los fuegos artificiales que resultan ser particularmente estresantes para los individuos que padecen este trastorno. A su vez, recomienda establecer medidas regulatorias como: “Pirotecnia Cero” cuya finalidad es prohibir o restringir el uso de fuegos artificiales para proteger a las personas con TEA, animales y al medio ambiente. De igual manera, propone como alternativa de solución el uso de protectores auditivos pasivos y ambientes seguros para reducir el estrés, así como incentivar el uso de espectáculos de luces sin música para la celebración de eventos evitando causar daños a estas personas.

El estudio de (Soares et al., 2023) consistió en evaluar el impacto de la contaminación sonora en niños y adolescentes que sufren de TEA en un rango de edad de 0 a 19 años, residentes en la Región Metropolitana de Recife en Brasil. Describe por medio de un análisis cuantitativo y cualitativo la hipersensibilidad auditiva en individuos con TEA vulnerables a los efectos negativos del ruido excesivo en su salud y bienestar. Aplicó un cuestionario con 33 preguntas a 149 tutores de niños y adolescentes con TEA. Estos resultados mostraron que el 67% de ellos residían en áreas ruidosas y el 66% de ellos eran sensibles a ruidos urbanos y solo el 36% de los familiares de estas personas con TEA habían realizado denuncias por contaminación sonora, siendo los principales ruidos reportados los de electrodomésticos, fuegos artificiales y construcción civil, concluyendo de esta manera que la contaminación sonora afecta negativamente a las personas con TEA

agudizando su sensibilidad y afectando la calidad de vida, concluye recomendando la necesidad de políticas y acciones para mitigar estos efectos en esta población vulnerable.

De las investigaciones realizadas sobre el Trastorno del Espectro Autista, se observa un gran impacto en la hipersensibilidad auditiva sobre todo en ruidos estocásticos y poco controlados. Los estudios previos sobre el ruido y el impacto en la sociedad señalan la poca implementación de sistemas que mitiguen o reduzcan los niveles de ruido hacia los individuos con TEA. Además de ello no existen investigaciones sobre control de ruido activo enfocado a un control para personas con TEA, por lo que se propone desarrollar un algoritmo de control FxLMS con un determinado step size, considerando que presenta los mejores resultados en su control adaptativo para varios tipos de ruido doméstico.

2.3 Bases teóricas

2.3.1. *Software*

- **Matlab**

Este software interactivo, permite resolver problemas matemáticos computacionales por medio de formulaciones de matrices y vectores, así mismo, permite el desarrollo de algoritmo, análisis de datos, modelamiento y simulación de aplicaciones por medio de la interfaz de programación y el uso de la herramienta Simulink (MathWorks, 2023) que garantiza construir un sistema completo por medio de su programación en diagrama de bloques.

- **Ableton Live Lite**

Es una versión limitada y gratuita de un software de diseño creación, grabación edición y mezcla de audio. Que permite definir frecuencias de muestreo ajustables como: 44.1 kHz, 48 kHz, 96 kHz, entre otros. Así como resolución

de cuantización de profundidad de bits de hasta 32 bits, así mismo permite exportación en múltiples formatos como .wav, .mp3, .flac, etc.

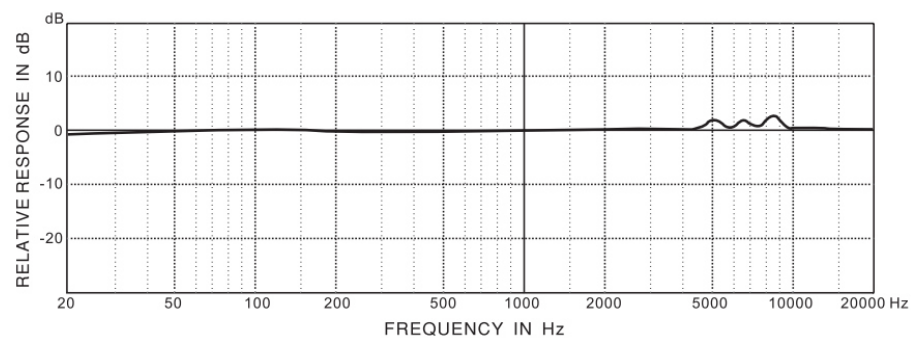
2.3.2. Hardware y equipos

- **Micrófono de medición Behringer ECM 8000**

El micrófono de medición Behringer ECM8000 es un micrófono de condensador especialmente diseñado para aplicaciones de medición y análisis de audio. Se utiliza comúnmente para medir la respuesta en frecuencia de sonido en vivo debido a su respuesta en frecuencia plana, como se puede observar en la Figura 15, es por ello que esta características y su sensibilidad para la captación de sonidos hace que sea ideal para esta aplicación (Behringer, 2013).

Figura 15

Respuesta en frecuencia de micrófono Behringer ECM 8000.



Nota. La gráfica muestra una respuesta en frecuencia entre 20 a 20 kHz casi plana para un micrófono Behringer ECM 8000. Fuente: (Behringer, 2013)

- **Interfaz de Audio Minifuse 2**

Es un dispositivo diseñado para permitir la conexión de equipos de audio a una computadora para la reproducción de audio de alta calidad y recolección de sonido de señales analógicas de un micrófono para esta tesis, este equipo es mostrado en la Figura 16 con dos entradas analógicas para captar señales de

micrófono. Esta interfaz de audio convierte las señales analógicas en señales digitales y viceversa, permitiendo que los equipos externos se comuniquen con la computadora (Arturia, 2021). Estos equipos suelen incluir convertidores de audio de alta calidad y preamplificadores de micrófono que mejoran la calidad de audio al minimizar el ruido y la distorsión. Esto permite obtener grabaciones más limpias y detalladas.

Figura 16

Interfaz de audio Minifuse 2



Nota. La gráfica muestra las entradas micrófono de la interfaz de audio Minifuse 2.
Fuente: (Arturia, 2021)

En el Anexo A, se presenta el presupuesto desglosado para la implementación de este sistema, que incluye: el rubro de recursos humanos, que abarca el desarrollo de trabajo y el derecho de sustentación; el rubro de bienes, que comprende los equipos y materiales utilizados, como el micrófono de medición, altavoz, laptop, interfaz de audio, cable XLR y el software Matlab; y finalmente, el rubro de servicios, que contempla los costos de fotocopias, tipeo y servicios de internet.

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1 Hipótesis

3.1.1 *Hipótesis general*

El algoritmo FxLMS en auriculares reduce cuatro tipos de ruidos domésticos mediante el diseño de un sistema de cancelación activo para personas con Trastorno del Espectro Autista (TEA)

3.1.2 *Hipótesis específicas*

El tiempo y la frecuencia de sonido de los cuatro tipos de ruidos (ruido de ladridos, golpe de puerta, pirotecnia y motor de licuadora) es heterogénea, los cuáles influyen en el diseño del sistema de cancelación de ruido.

El sistema de cancelación Feedforward determina el mayor control de ruido doméstico (ladridos, golpe de puerta, pirotecnia y motor de licuadora) en auriculares.

La estabilidad medida a través del coeficiente de convergencia para los cuatro tipos de ruidos domésticos determina el diseño y la simulación del sistema de cancelación de ruido usando el algoritmo FxLMS.

3.2 Variables

3.2.1 *Variable independiente*

Sistema de cancelación activa de ruidos domésticos en auriculares.

3.2.2 *Variable dependiente:*

Ruido en personas con Trastorno del Espectro Autista

3.3 Operacionalización de Variables

3.3.1 Dimensiones de la variable independiente

La variable independiente: Sistema de cancelación de ruido activo de ruidos domésticos posee las siguientes dimensiones:

- a) Diseño del sistema codificado, utilizando el algoritmo FxLMS para la eliminación de ruido.
- b) Respuesta en tiempo y frecuencia de ruido doméstico con mayor concentración de ruido
- c) Modelación de Caminos de propagación en auriculares ANC.
- d) Simulación y Validación del Sistema mediante el análisis del comportamiento con grabaciones reales de ruido doméstico.

3.4 Enfoque de la investigación

La presente investigación corresponde al enfoque cuantitativo, controlando de forma directa las variables del sistema de cancelación de ruido para ser aplicado en personas con Espectro Autista, así como el diseño requerido por la investigación. El enfoque cuantitativo utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías (Hernández Sampieri et al., 2014)

3.5 Alcance de la investigación

Para la investigación realizada se utiliza el alcance descriptivo debido a la descripción del fenómeno de cancelación de ruido activo que se llevó a cabo a través del algoritmo FxLMS en la investigación. En una investigación de tipo descriptiva se busca describir las cualidades de un fenómeno mediante la evaluación de comportamientos o condiciones de un fenómeno en específico (Salkind, 2012).

3.6 Diseño de la investigación

El diseño del estudio corresponde a un diseño no experimental, se basó en el diseño y simulación del control directo de ruido doméstico con el sistema de cancelación de

ruido activo aplicado a diferentes tipos de ruido para observar su comportamiento. Un diseño no experimental es un enfoque de la investigación que es comúnmente utilizado para observar y describir características de un fenómeno brindando una representación detallada de un evento específico (Salkind, 2012).

3.7 Técnicas e instrumentos de recolección de información

3.7.1 *Instrumentos de recolección de datos*

Los instrumentos de recolección de dato permiten recabar información válida y confiable para una determinada utilidad práctica” (Corral, 2009). El instrumento utilizado fueron los scripts y la consola de Matlab (MathWorks, 2023), además, se usó el programa Microsoft Excel para el análisis de los datos recolectados de coeficiente de convergencia.

3.7.2 *Técnicas de recolección de datos*

La técnica utilizada para procesar los datos de la investigación fue realizada por un procesamiento electrónico de datos de manera computarizada, mediante las gráficas de tiempo y frecuencia se midieron datos proporcionados por señales de ruido simuladas y la disminución de nivel en frecuencias determinadas que afectan a las personas con TEA. Así mismo, mediante un análisis de datos de las gráficas propuestas por el programa Matlab y con ayuda del programa Microsoft Excel mediante técnicas de análisis estadístico se realizó una comparación de step size posteriores al control de ruido.

En el Anexo B se presenta la matriz de consistencia, la cual describe la metodología utilizada en esta investigación. Su objetivo es organizar y evidenciar la relación entre hipótesis, variables, problemática y objetivos planteados para el desarrollo del proceso de control de ruido propuesto.

CAPITULO IV: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

4.1 Metodología para el desarrollo de la solución

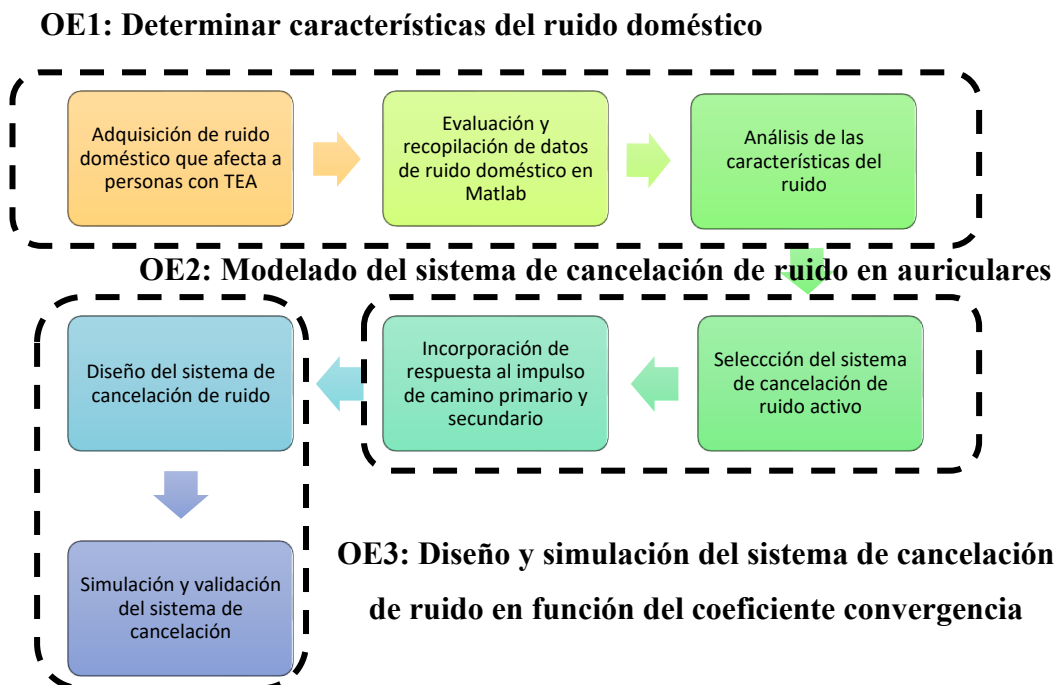
Como primer paso para el desarrollo del sistema, se capturó la señal de ruido doméstico que afecta la hipersensibilidad auditiva de las personas con Trastorno del Espectro Autista. Posteriormente, los datos obtenidos fueron recopilados y procesados en el software Matlab, con el fin de analizar sus características en función del tiempo y la frecuencia, lo que permitió evaluar su comportamiento en el sistema de cancelación activa de ruido y permitió conocer a detalle las características de ruido predominantes previos al modelado.

Para realizar el modelado del sistema de cancelación de ruido para personas con TEA, se empleó la respuesta al impulso de las rutas acústicas de un sistema de auriculares tipo in-ear (rutas de propagación primaria y rutas de propagación secundaria), con el objetivo de describir el comportamiento acústico de los caminos de propagación del sonido. Una vez definido el modelo acústico, y el tipo de ruido se seleccionó la estrategia de control en base a los ruidos previamente analizados, para luego diseñar el algoritmo adaptativo FxLMS teniendo en cuenta un modelado estimado del camino de propagación secundaria, con la finalidad de lograr la cancelación deseada del ruido.

Una vez diseñado el sistema de cancelación de ruido activo, se llevaron a cabo pruebas y simulaciones para evaluar su desempeño. Durante esta etapa, se ajustaron los parámetros de control, específicamente el coeficiente de convergencia, con el objetivo de mejorar la respuesta del sistema y optimizar su funcionamiento frente a las señales de ruidos domésticos. Finalmente, se validaron los resultados mediante la medición de atenuación de ruido, así como la evaluación del rendimiento y estabilidad del sistema diseñado. El procedimiento realizado para el desarrollo de esta investigación se presenta en la Figura 17.

Figura 17

Fases del desarrollo de la investigación.



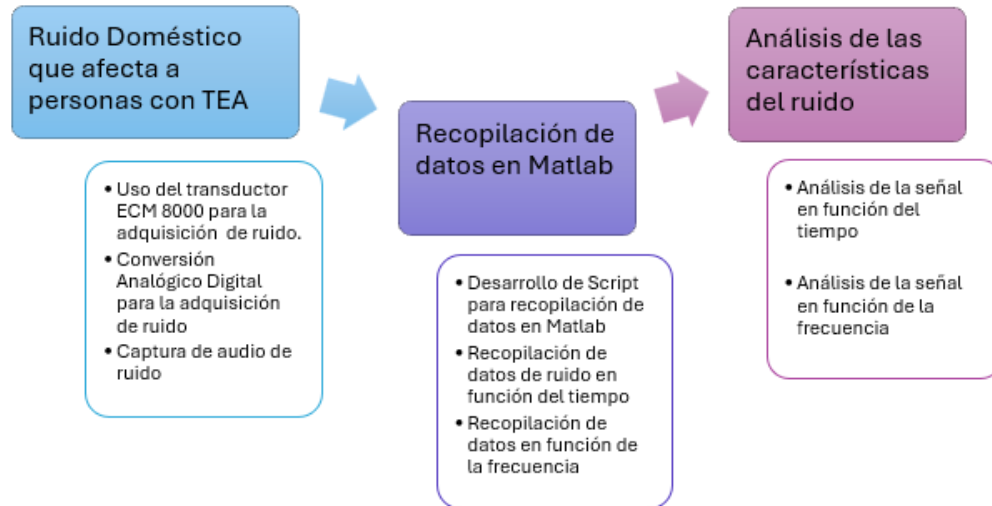
Nota. La gráfica muestra los objetivos específicos del desarrollo de la investigación con los procedimientos principales de cada objetivo. Fuente: Elaboración propia

4.2 Características del sistema de cancelación de ruido doméstico

En esta sección se llevó a cabo el proceso de adquisición, evaluación y análisis de señales de ruido doméstico que afecta a las personas con TEA. Para la adquisición de ruido se hizo uso del transductor ECM 8000 de la marca Behringer y mediante la conversión analógica – digital de la interfaz de audio se capturaron las señales de ruido doméstico. En la etapa de evaluación y recopilación se desarrolló un script en el software Matlab para evaluar su comportamiento en función del tiempo y la frecuencia. En la etapa de análisis de las características del ruido se determinó el tipo de ruido y cómo este posee picos de frecuencia que pueden afectar a personas con TEA así como la factibilidad de cancelación de ruido frecuencial. Este procedimiento por realizar se muestra en la Figura 18.

Figura 18

Proceso de adquisición de características del sistema de cancelación de Ruido Doméstico.



Nota. El gráfico muestra los pasos realizados para conseguir las características del sistema de cancelación de ruido doméstico. Fuente: Elaboración propia.

4.2.1 Adquisición de ruido doméstico que afecta a las personas con TEA

Con relación al proceso de adquisición de señales de ruido, se integró la etapa de transducción y digitalización mediante el uso de un micrófono de medición y una interfaz de audio. Para este proceso, se capturaron cuatro ruidos domésticos que afectan a personas con TEA, con el objetivo de analizar sus características y utilizarlas en el diseño del sistema de cancelación activa de ruido.

a) Uso del micrófono ECM 8000 para la adquisición de ruido doméstico: Como elemento principal para la adquisición de ruido doméstico, se utilizó el micrófono de medición Behringer ECM 8000 debido a las siguientes características:

- **Respuesta plana en su rango frecuencial:** Esta propiedad del micrófono permite capturar el sonido de forma precisa, sin introducir sesgos por amplificación o atenuación en el espectro de frecuencias. De esta manera se obtienen señales eléctricas representativas en las frecuencias graves, medios y agudos del ruido a capturar.

- **Sensibilidad:** Esta característica permite registrar con precisión los detalles esenciales del ruido doméstico, desde niveles de alta intensidad hasta sonidos de baja presión sonora (-70 dB), asegurando que se conserven aspectos relevantes para el análisis de sus características.
- **Nivel de presión sonora (SPL):** Esta propiedad permite manejar niveles elevados de presión acústica, lo cual resulta especialmente útil para captar ruidos intensos y variaciones bruscas, como las que se presentan en ruido de entorno doméstico.
- **Ominidireccionalidad:** Esta característica permite capturar el sonido con igual sensibilidad desde todas las direcciones, lo cual resulta ideal para registrar el ruido en un entorno doméstico.

b) Conversión analógico digital para la adquisición de ruido pirotécnico. La conversión de la señal analógica proveniente del micrófono a una señal digital fue realizada mediante la interfaz de audio Arturia Minifuse. Esta interfaz permite el muestreo de señales a frecuencias de hasta 196 KHz, lo que hace adecuada para grabaciones de alta fidelidad. En este caso la grabación del ruido doméstico se realizó con una frecuencia de muestreo (F_s) de 44.1KHz y una profundidad de 24 bits, garantizando una reconstrucción fiel de las señales dentro del rango audible humano (20 Hz a 20 kHz) siguiendo el criterio de muestreo de Nyquist expresado en base a la ecuación (1).

$$F_s \geq 2 \cdot (20\,000) \text{ Hz}$$

$$F_s \geq 40\,000 \text{ Hz}$$

Por ellos, se eligió un valor superior al mínimo requerido dado que es un estándar de grabación (44.1 kHz) con el fin de evitar problemas de Aliasing y preservar los armónicos de las señales de ruido y asegurar una calidad del sonido registrado. Así mismo, la interfaz proporciona una preamplificación que mantiene un nivel adecuado de señal conservando la claridad de los datos y minimizando las interferencias de grabación.

c) Captura de audio de ruido doméstico. El proceso de captura de audio se llevó a cabo mediante el software Ableton Live Lite, configurado con una frecuencia de muestreo de 44100 Hz. Mediante el uso de la interfaz de audio y un micrófono de

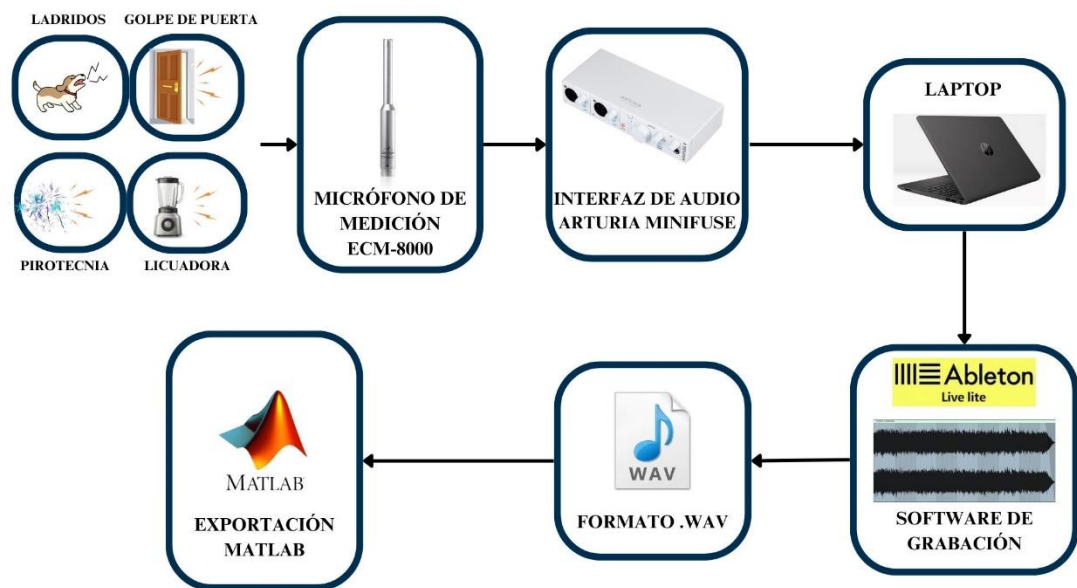
medición, se registraron las características acústicas de 4 señales de ruido presentes en entornos domésticos:

- Ruido pirotécnico.
- Ruido de motor de licuadora.
- Ruido de golpe de puerta.
- Ruido de ladridos.

Estas grabaciones fueron exportadas en formato .WAV con el fin de lograr una representación fiel del espectro sonoro capturado. Posteriormente, estos archivos fueron utilizados para analizar las características acústicas de cada señal de ruido en función del tiempo y frecuencia, mediante el software MATLAB (Figura 19).

Figura 19

Proceso de grabación de ruido doméstico



Nota. El gráfico muestra el proceso de grabación de ruido doméstico (ladridos, golpe de puerta, pirotecnia y licuadora). Fuente: Elaboración Propia.

4.2.2 Recopilación y evaluación de datos de ruidos domésticos en Matlab

Con el objetivo de analizar los cuatro ruidos seleccionados, se creó un script en el software Matlab que permite la recopilación y visualización de datos correspondientes

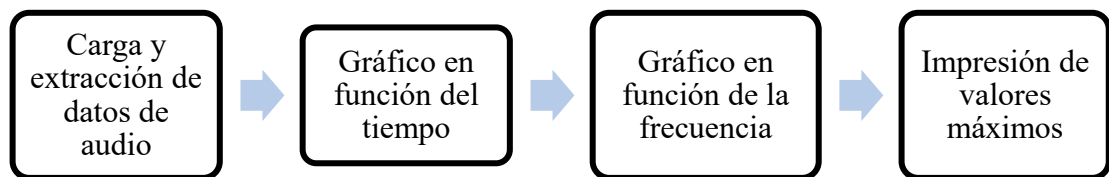
a cada señal, con el fin de observar su comportamiento en función del tiempo y la frecuencia.

a) Recopilación de datos usando un script de Matlab.

Se desarrolló un script en Matlab con el fin de carga y procesar cuatro archivos de ruido en formato WAV (sonido de pirotecnia, sonido de licuadora, sonido de golpe de puerta y sonido de ladridos). Este script permite extraer las muestras de cada señal en función de la duración de cada sonido. Además, facilita el análisis y representación gráfica de las señales en el dominio del tiempo y la frecuencia. El proceso general del script se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 20.

Figura 20

Diagrama de flujo de recopilación de datos



Nota. La gráfica anterior muestra el diagrama de flujo para la recopilación de datos de los ruidos recolectados Fuente: Elaboración Propia

b) Evaluación de datos de ruidos domésticos en dominio del tiempo.

Esta evaluación permite comprender las principales características de los ruidos recolectados a lo largo del tiempo con la finalidad de facilitar el proceso de atenuación. Las variables consideradas en esta evaluación son las siguientes:

- **Amplitud de la señal:** Representa la intensidad de la señal de ruido y representa la cantidad de energía transmitida. Las señales fueron normalizadas para una comparación objetiva.

- **Duración:** Corresponde al tiempo total de cada señal en el tiempo. Se expresa en segundos (s) y permite identificar la duración de ruido de las cuatro señales.
- **Distribución de energía:** Se analiza la cantidad de energía en la señal para determinar patrones de periodicidad, mediante la observación de picos de amplitud presente.

En el caso de los ruidos domésticos previamente registrados, las señales pueden presentar características impulsivas y de corta duración. Esto exige que el sistema de cancelación de ruido procese y responda de manera dinámica, ya que, si no se encuentra preparado para cambios abruptos, podría generar una cancelación deficiente. Este resultado marca una diferencia significativa en la incomodidad percibida de las personas con TEA, cuya sensibilidad auditiva es hipersensible en muchos casos.

c) Evaluación de datos de ruidos domésticos en el dominio de la frecuencia

De igual manera, se realiza una evaluación en función de la frecuencia para cada una de las cuatro señales, utilizando la Transformada de Fourier. Este análisis permite una mejor comprensión de las características principales espectrales, tales como:

- **Rango de frecuencias:** Corresponde al intervalo en el que se distribuye la energía de la señal, en él se describe su comportamiento en las bandas de frecuencias bajas, medias y altas. Este rango permite identificar qué componentes frecuenciales predominan en cada ruido analizado.
- **Intensidad sonora en función de la frecuencia:** Hace referencia a la energía presente en una determinada banda de frecuencia, permitiendo destacar aquellas áreas espectrales en las que se acumula mayor contenido energético de la señal.

En el análisis de las características de ruido en el dominio de la frecuencia, es esencial considerar tanto la intensidad sonora como el rango de frecuencias. Esto permite identificar los componentes espectrales predominantes del ruido y en consecuencia poder suprimirlo dentro de una determinada banda específica según la intensidad de contenido energético. De esta manera, se mejora la eficacia del proceso de atenuación.

4.2.3 *Análisis de las características del ruido doméstico*

A partir de la evaluación de características de ruido doméstico y la visualización de datos obtenidos en Matlab, se procede a analizar las cuatro señales de ruido registradas, según:

- **Tipo de Ruido:** Corresponde a la naturaleza espectral y temporal del ruido, el cuál puede clasificarse como ruido de banda ancha, banda limitada, impulsivo o continuo. Esta caracterización es fundamental para determinar la distribución de energía y el comportamiento acústico de la señal, así como la forma en que es percibida o procesada, tanto por el oído humano como por el sistema de cancelación activa de ruido.
- **Amplitud máxima frecuencial:** Indica la frecuencia en la que el sonido presenta su mayor amplitud dentro del análisis espectral de Fourier. Este valor representa el pico de energía del ruido, y permite identificar el componente dominante del espectro. Resulta útil para seleccionar estrategias de cancelación y establecer una relación con el nivel de molestia potencial en la sensibilidad del oído humano.
- **Cancelación frecuencial:** Según las características obtenidas se analiza la factibilidad de aplicar técnicas de cancelación de ruido activa en función del tipo y características del ruido según la siguiente clasificación:

Desempeño esperado: Para señales de ruidos continuos y predecibles.

Desempeño aceptable: Para señales de ruido parcialmente impredecibles o instantáneos con una dificultad intermedia.

Desempeño limitado: Ruidos con un espectro amplio de señales frecuenciales poco predecibles para generar una onda destructiva.

- **Molestia en personas con TEA:** Corresponde al grado de incomodidad o sensibilidad que un determinado sonido puede generar en personas con TEA, quienes suelen presentar hiperacusia. Esta molestia se evalúa en función del rango frecuencial del sonido, utilizando como referencia las curvas isofónicas, dado que la mayor respuesta de sensibilidad del oído humano se concentra entre los 1000 Hz

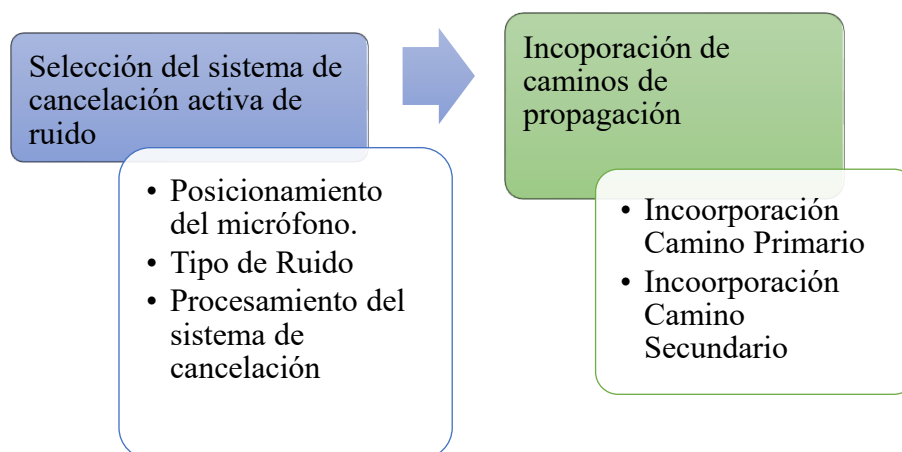
y 5 KHz. Según el rango de frecuencias involucrados en el espectro del ruido, la molestia se clasifica en: muy alto, alto, medio y bajo.

4.3 Modelamiento del sistema de cancelación de ruidos domésticos en auriculares para personas con TEA

En la Figura 21 se presenta el diagrama de flujo que describe el proceso de selección del sistema de cancelación ideal, basado en las características de los ruidos previamente analizados, y orientado a su aplicación en auriculares in ear Bose QC20 mediante la incorporación de las propiedades físicas y acústicas del audífono.

Figura 21

Diagrama de flujo del modelamiento del sistema



Nota. El gráfico representa el diagrama de flujo del proceso de modelado, comenzando con la selección del sistema de cancelación activa de ruido ideal más adecuado. Además, se integran los caminos de propagación del sonido en función de la respuesta acústica del auricular. Fuente: Elaboración Propia

4.3.1 Selección del sistema de cancelación de ruido activo

Los sistemas de cancelación de ruido activo se dividen principalmente en dos arquitecturas: Feedforward y FeedBack, cuya elección depende fundamentalmente de las siguientes características:

a) Selección y distribución de micrófonos:

En los sistemas de cancelación activa de ruido del tipo Feedforward y FeedBack, la configuración y ubicación de los micrófonos se consideran aspectos fundamentales en el diseño del método de cancelación. La ubicación óptima de los micrófonos, junto con la direccionalidad del sonido y anticipación de la señal, permite capturar el ruido antes de que alcance al usuario, optimizando así la eficiencia del sistema de cancelación.

b) Tipo de ruido por cancelar.

La elección del tipo de sistema de cancelación de ruido activo ya sea FeedBack o feedforward, depende en gran medida de la efectividad requerida según el tipo de ruido a atenuar. Para ello, es fundamental conocer las características espectrales de cada sonido, lo que permite identificar la distribución de energía en frecuencia de los distintos ruidos analizados (pirotecnia, licuadora, golpe de puerta y ladridos). Esta información es clave para la selección del tipo de control adecuado para el diseño.

c) Procesamiento del sistema de cancelación de ruido

La elección del sistema de cancelación de ruido activo también está condicionada por la capacidad de procesamiento y el hardware requerido para generar una señal antiruido en tiempo real, así mismo es importante debido a la estabilidad para anticipar el ruido y su cancelación efectiva con el usuario en las frecuencias sensibles a identificar, así como el costo computacional que percibe un chip DSP.

4.3.2 Incorporación de respuesta al impulso del camino primario y secundario

Para llevar a cabo el modelamiento del sistema de cancelación, se ha considerado la recolección de información de los caminos de propagación, con el objetivo de optimizar el desempeño del sistema acústico en el entorno específico de auriculares in-ear. El uso de auriculares resulta adecuado en esta aplicación, dada su capacidad de

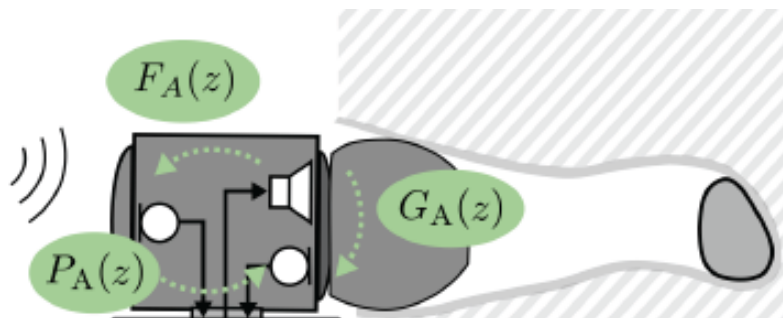
atenuación pasiva y activa, lo que mejora significativamente el desempeño de cancelación de ruido ante diversos tipos de ruido. Además, su uso resulta particularmente beneficioso para las personas con TEA, debido a su adaptabilidad a diferentes entornos, comodidad sensorial y eficacia en la reducción de estímulos sonoros intensos (Dotch et al., 2023). Por tanto, se optó por diseñar un sistema de cancelación de ruido activo basada en el algoritmo FxLMS, con el propósito de modelar los caminos de propagación del sonido en los auriculares y mejorar su desempeño acústico.

Es necesario identificar las rutas primarias y secundarias para ajustar correctamente el modelo de cancelación acústica específica de las auriculares in ear. Para ello, se hace uso de una base de datos disponible en el estudio de (Liebich et al., 2019), la cual proporciona información detallada sobre mediciones y simulaciones del desempeño acústico en los auriculares Bose QC20, realizadas en 23 sujetos dentro de una cabina acústica. Es relevante destacar que dichas mediciones se llevaron a cabo sin activar el hardware de la cancelación de ruido activa del sistema, con el fin de aislar y analizar únicamente las propiedades del sistema acústico y las rutas de propagación. En la Figura 22, se muestra la estructura interna de las auriculares in ear, así como los caminos de propagación a través de los cuáles se propaga la señal de ruido:

- $P_A(z)$: Camino de propagación primaria
- $G_A(z)$: Camino de propagación secundaria
- $F_A(z)$: Camino de retroalimentación acústico

Figura 22

Estructura de audífonos in ear con electrónica de cancelación de ruido.



Nota. El gráfico representa las funciones de transferencia de los caminos de propagación al interior de un audífono in-ear. Fuente: (Liebich et al., 2019)

Para la presente investigación, se utilizarán únicamente el camino de propagación primario y el camino de propagación secundario, con el fin de ajustar el diseño para auriculares. No obstante, el control del camino de retroalimentación ($F_A(z)$) requiere métodos de control más sofisticados debido a la acústica de los auriculares, así mismo la investigación de (Liebich et al., 2019) considera con un valor aproximado de cero para la función de transferencia del camino de retroalimentación.

La medición del comportamiento acústico de la base de datos fue realizada mediante un método que consistió en ubicar un altavoz externo a una distancia de 1 metro aproximadamente del usuario, generando un barrido logarítmico de frecuencias con una tasa de muestreo de 48 kHz y con una duración de 4.05 segundos, lo cual permitió obtener las respuestas al impulso de los caminos de propagación. Para establecer el modelamiento del sistema mediante las auriculares in ear es primordial reconocer la respuesta al impulso y respuesta en función de la frecuencia de ambos caminos de propagación:

a) Camino de propagación primaria (Primary Path)

El camino de propagación primaria se define como el trayecto que sigue el ruido no deseado desde su fuente de origen hasta el punto donde se lleva a cabo el proceso de cancelación, normalmente se encuentra ubicado entre el micrófono de referencia y el micrófono de error, ubicado cerca del oído del usuario. Esta trayectoria se encuentra influenciada por la geometría y construcción del dispositivo por el cual se reproduce el ruido, además de fenómenos acústicos como reflexiones, absorción, reverberación, entre otros.

b) Camino de propagación secundaria

El camino de propagación secundario representa la trayectoria que recorre la señal de cancelación de ruido (antiruido), desde la fuente de antiruido hasta el micrófono de error. Este trayecto describe la respuesta acústica del entorno físico en el que se propaga la señal antiruido, ya que el recorrido puede afectar la señal de cancelación debido a fenómenos como reflexiones, absorciones, difracciones, etc. En consecuencia, la señal antiruido generada por el sistema

puede sufrir modificaciones antes de ser captada por el micrófono de error, debido a las características acústicas del camino secundario.

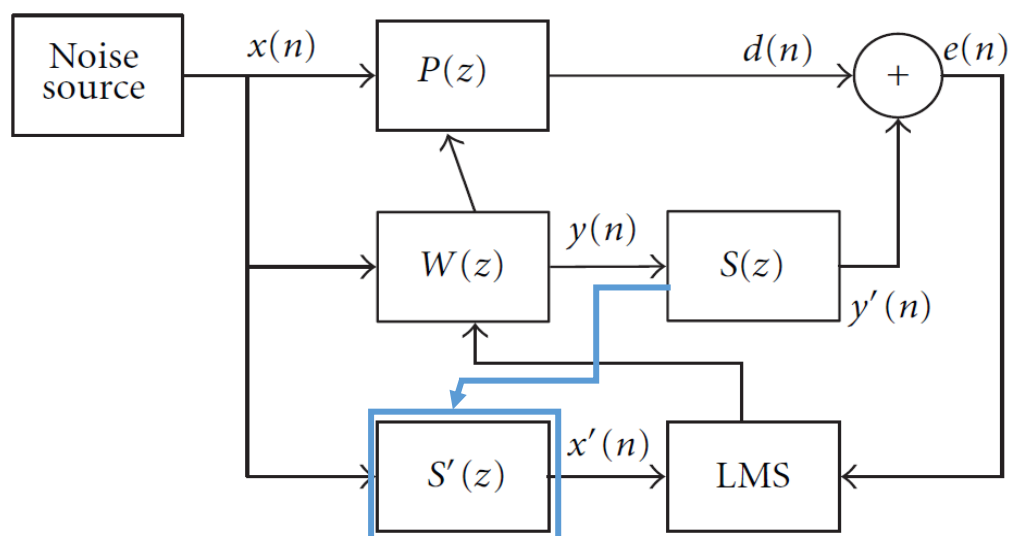
c) Modelado del camino de propagación secundaria (Secondary Path)

Para diseñar correctamente el sistema de cancelación activa de ruido utilizando el algoritmo FXLMS es fundamental modelar y estimar con precisión el camino de propagación secundaria. Esto se debe a que cualquier modificación que experimente la señal de cancelación al atravesar el camino de propagación secundario, puede afectar significativamente el rendimiento del sistema.

Para mejorar el desempeño del sistema, se incorpora una estimación del camino secundario $S'(z)$ tomando en cuenta la respuesta real del camino de propagación secundaria $S(z)$, tal como se observa en el diagrama de bloques de la Figura 23, ya que una estimación incorrecta del camino de propagación secundario puede generar un error no previsto en la actualización del algoritmo, y en lugar de atenuar el ruido, podría amplificarlo, disminuyendo la efectividad del sistema de cancelación

Figura 23

Diagrama de bloques de algoritmo FxLMS con estimación secundaria.



Nota. El gráfico muestra el diagrama de bloques del sistema de cancelación de ruido activo FXLMS para la estimación del camino de propagación secundaria del sistema.
Fuente: (Sahib & Kamil, 2011)

Considerando estos aspectos, para estimar adecuadamente el camino de propagación secundaria, se emplea la versión normalizada del algoritmo LMS (NLMS), este algoritmo permite que el sistema de cancelación prediga y cancele eficazmente el ruido normalizando el step size o coeficiente de convergencia. Este proceso de estimación se desarrolla mediante los siguientes pasos:

- **Importación de datos:** Se procede a cargar la respuesta al impulso del camino secundario desde un archivo .txt obtenida de la base de datos del auricular.
- **Filtrado de frecuencias:** Se define un filtro pasa banda de orden 12 de tipo Chebyshev II, con un rango de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz acotando la respuesta frecuencial del camino al espectro audible.
- **Generación de señal de excitación:** Se genera una señal de ruido aleatorio con una duración de 3.75 segundos, la cual es utilizada como entrada para estimular el sistema durante la estimación del camino secundario
- **Estimación mediante NLMS:** Se aplica el algoritmo NLMS para ajustar los coeficientes del filtro FIR adaptativo, en el que se busca una aproximación de la respuesta al impulso del camino secundario real.

4.4. Diseño y simulación del sistema de cancelación de ruido doméstico en función del coeficiente de convergencia

4.4.1. Diseño del sistema de cancelación de ruido activo Feedforward FxLMS

Para realizar el proceso de diseño del sistema de cancelación de ruido activo FxLMS Feedforward, es necesario considerar los siguientes elementos fundamentales:

- a) **Señal de referencia de la señal $x(k)$.** Esta señal corresponde al ruido recopilado en formato .wav, que contiene el vector de muestras utilizado como

señal de referencia. Estos datos son almacenados en una variable específica para su posterior procesamiento dentro del sistema de cancelación activa.

- b) Camino de propagación primaria.** Se utiliza la respuesta al impulso de Primary Path $P(z)$, proveniente de la base de datos recolectada con anterioridad, con el propósito de aproximar el diseño al comportamiento acústico de auriculares in ear.
- c) Estimación de camino de propagación secundaria.** Se emplea la respuesta al impulso del camino de propagación secundaria estimado $S'(z)$ para su integración en el proceso de cancelación de ruido activo mediante el algoritmo FxLMS, cuya función es el de compensar adecuadamente las alteraciones acústicas de la señal antiruido antes de llegar al micrófono de error.
- d) Ajuste de coeficiente de convergencia.** Es importante determinar el coeficiente de convergencia a utilizar, debido a que determina qué tan rápido y qué tan preciso el sistema se adapta a los cambios del entorno acústico.

Para el proceso de diseño es necesario inicializar los vectores del algoritmo FxLMS, principalmente para el almacenamiento de las señales de entrada, de error y de los coeficientes del filtro adaptativo. Dichos vectores se proceden a actualizar en bucle una determinada cantidad de iteraciones para la actualización del algoritmo FxLMS y modificar así los coeficientes del filtro adaptativo para mejorar la cancelación de ruido activa en función del ruido doméstico procesado. En el Anexo C se observa el código empleado para el diseño del sistema de cancelación de ruido activo FxLMS para personas con TEA en auriculares in ear

A continuación, se presenta la ecuación (17) correspondiente a la actualización de coeficientes del filtro adaptativo y el proceso de adaptación del algoritmo para la cancelación del sistema.

$$w(k+1) = w(k) + ue(k)x_s(k)$$

Donde:

- **$x(k)$:** Señal de entrada al filtro adaptativo, compuesta por las muestras del ruido recopilado.

- **Filtrado primario (Primary Path):** La señal de ruido se filtra a través del camino primario con el objetivo de modelar cómo el sonido se propaga desde la fuente hasta el micrófono de error. Si bien no es necesario utilizar el camino de propagación primaria para realizar la actualización de coeficientes del filtro adaptativo, es útil para aproximar la señal a su uso en auriculares y lograr el objetivo de cancelación de ruido en personas con TEA siendo útil para el cálculo del error de cancelación.
- **Filtrado secundario (Secondary Path):** El camino secundario filtra la señal de ruido para modelar la respuesta desde el altavoz hasta el micrófono de error y actualizar el algoritmo. Esta señal filtrada se expresa como:

$$x_s(k)=S \cdot x(k)$$

- **Señal de cancelación $y(k)$:** Se genera a partir del producto entre los coeficientes del filtro adaptativo y la señal de entrada. Esta señal de cancelación representa la señal de antiruido.

$$y(k)=w(k)^T \cdot x(k)$$

- **Coeficientes del filtro $w(k+1)$:** Representa el vector de coeficientes del filtro adaptativo en cada iteración k . Su actualización se realiza según la ecuación del algoritmo FxLMS.

$$w(k+1)= w(k)+ue(k)x_s(k)$$

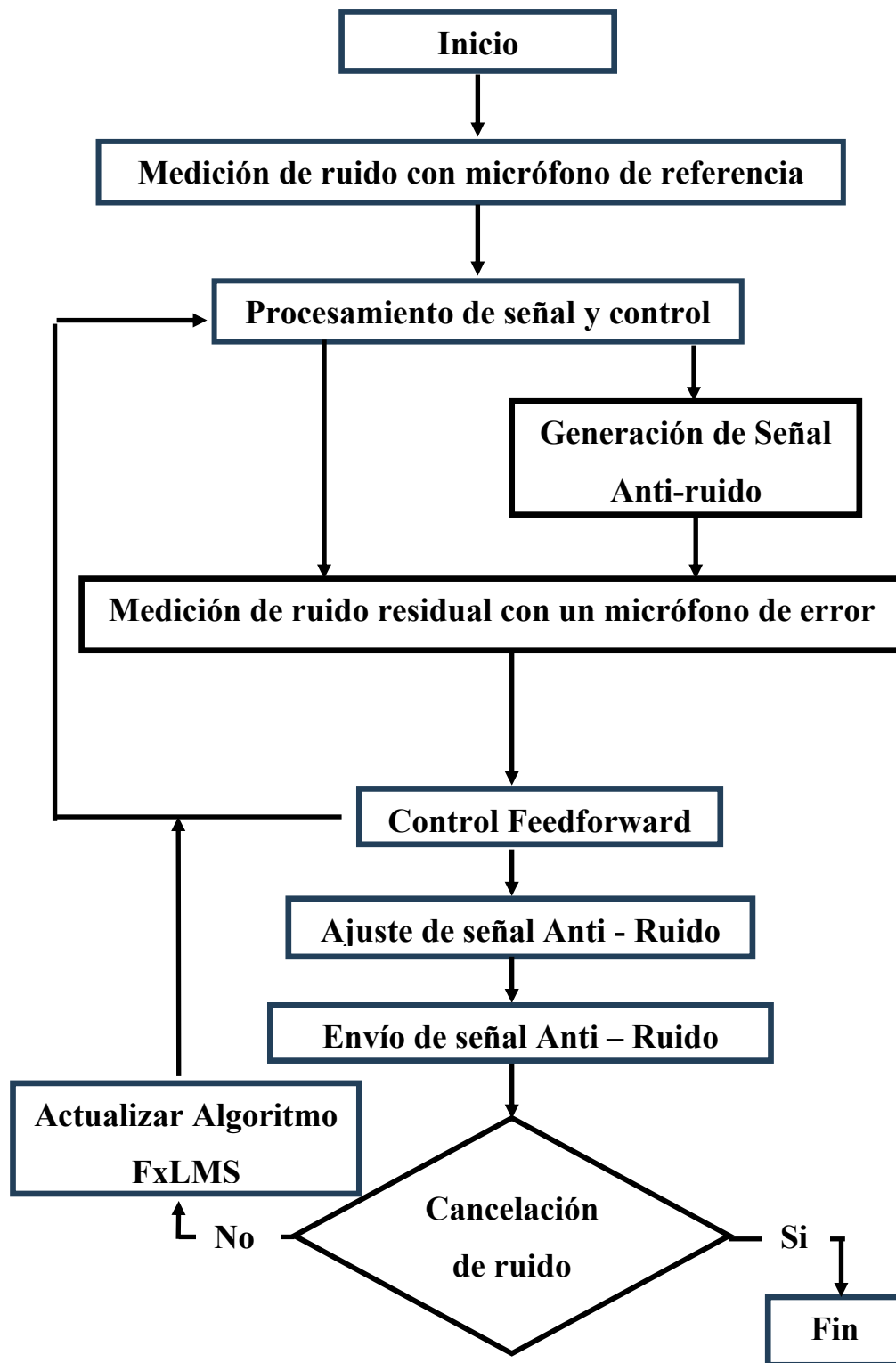
- **Señal de error $e(k)$:** Esta señal se obtiene como la diferencia entre la señal filtrada por el camino primario $d(k)$ y la señal antiruido generada $y(k)$ que posee una polaridad inversa a la señal original.

$$e(k)=d(k)+(-y'(k))$$

Este proceso de cancelación se ejecuta durante todas las iteraciones, actualizando continuamente los coeficientes del filtro en función del error obtenido en cada iteración. Este procedimiento es mostrado en el diagrama de flujo de la Figura 24.

Figura 24

Diagrama de flujo del sistema de cancelación de ruido activo.



Nota. El gráfico muestra el diagrama de flujo del sistema de cancelación de ruido activo FxLMS de inicio a fin. Fuente: Elaboración Propia

4.4.2. Simulación y validación del sistema de cancelación y de ruidos domésticos

Para el proceso de validación del sistema de cancelación activa de ruido se utilizó una señal con frecuencia de 1KHz. Esta frecuencia es utilizada como estándar en pruebas de audio, ya que la mayoría de los sistemas de reproducción están optimizados para operar eficientemente y reproducir esta señal, lo que facilita la configuración para el análisis en dominio del tiempo y la frecuencia.

Se tiene en cuenta para la validación del sistema de cancelación de ruido FxLMS en auriculares in ear:

La evolución de coeficientes del filtro adaptativo: Se refiere al cambio dinámico de los coeficientes del filtro para adaptarse a condiciones estables durante un tiempo determinado de funcionamiento.

Error cuadrático medio (MSE): Cuantifica el residuo entre la señal de error y la señal de referencia. En un sistema de cancelación de ruido activo, un valor bajo de MSE indica una cancelación eficiente del ruido.

Atenuación en función del tiempo y frecuencia: Este proceso de validación determina la reducción de ruido a lo largo del tiempo y en diferentes bandas de frecuencia, de esta manera se determina si la atenuación es constante y efectiva en determinados rangos frecuenciales.

Para garantizar una evaluación comparativa del desempeño del sistema de cancelación activa frente a los cuatro tipos de ruidos adquiridos (pirotecnia, licuadora, golpe de puerta y ladridos), se utilizarán los tres criterios anteriores de evaluación de la frecuencia de 1 KHz, de tal modo que se determine la eficacia del algoritmo FxLMS frente a distintas bandas frecuenciales y temporales del ruido, enfocándose principalmente en aquellos que generan mayor molestia en personas con Trastorno del Espectro Autista.

CAPITULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

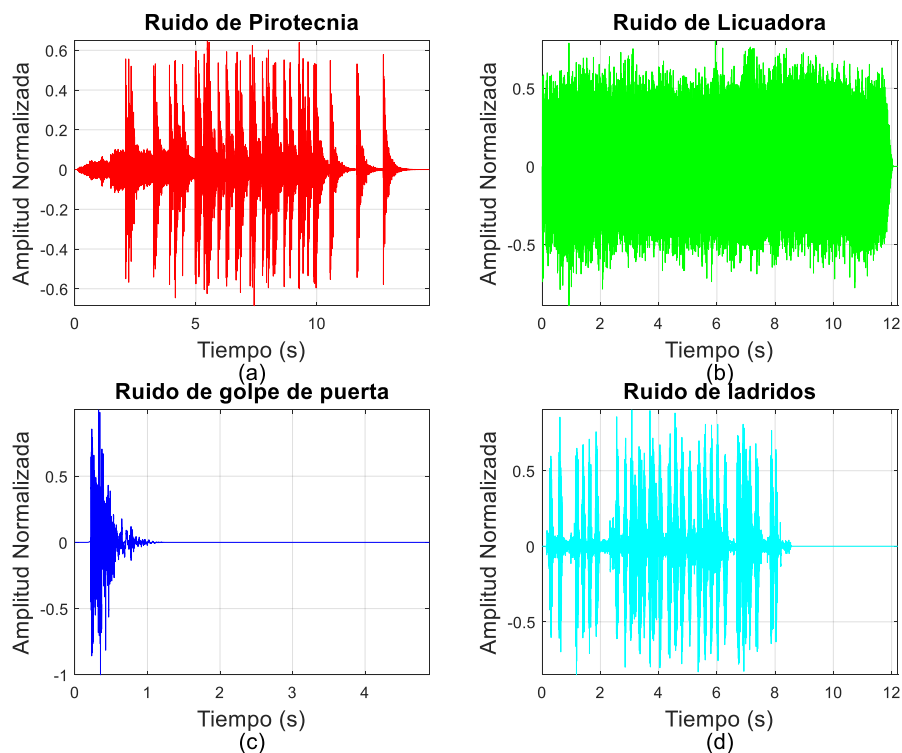
5.1. Características determinadas del ruido doméstico

Mediante el uso del micrófono de grabación ECM 8000, la interfaz de audio Arturia Minifuse y el programa Ableton Live Lite se procesó y capturó las cuatro señales de ruido satisfactoriamente, y con ayuda del software Matlab se realizó la carga de estos archivos tipo .wav en un script codificado donde se graficó, analizó y evaluó estas señales de audio en tiempo y frecuencia.

Se procede a recopilar y evaluar las características de ruido doméstico de las cuatro señales en función del tiempo:

Figura 25

Señales de ruido doméstico en función del tiempo: (a) ruido pirotécnico, (b) ruido de licuadora (c) ruido de golpe de puerta (d) ruido de ladrido de perros.



Nota. El gráfico muestra los cuatro ruidos en función del tiempo y amplitud normalizada. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Figura 25 se identifican los parámetros característicos de cada tipo de ruido adquirido, lo que permitió evaluar individualmente cada una de sus propiedades acústicas en el tiempo.

- **Ruido pirotécnico:** En la Figura 25 (a) se observa una señal con amplitud e intensidad variable a lo largo del tiempo. El valor pico más alto registrado de la señal es de 0.65, que representa las explosiones de mayor intensidad. La duración total del audio es de 14.7 segundos. La señal no presenta un comportamiento regular, es decir, no es constante en el tiempo, ya que alterna entre periodos de baja amplitud y picos súbitos de alta intensidad, lo cual refleja la característica impredecible del ruido pirotécnico.
- **Ruido de licuadora:** En la Figura 25 (b) se observa una señal con una amplitud prácticamente constante a lo largo del tiempo, alcanzando un valor pico máximo de 0.8. La intensidad del ruido se mantiene estable y continua durante toda la duración de la señal, que es 12.2 segundos. Este ruido se caracteriza por su comportamiento uniforme, constante y periódica a través del tiempo.
- **Ruido de golpe de puerta:** En la Figura 25 (c) se observa un pico de amplitud de intensidad que alcanza su valor máximo 1 en un instante corto de tiempo, seguido por una rápida disminución. La duración total de la señal es de 4.9 segundos, y se caracteriza por ser una señal no repetitiva en el tiempo.
- **Ruido de ladrido de perros:** En la Figura 25 (d) se observa una señal con picos variables de amplitud a lo largo del tiempo. La intensidad de la señal fluctúa entre valores de energía mínima y máxima en breves intervalos, alcanzando un valor pico máximo de 0.9. La duración total de la señal es de 12.2 segundos y no presenta características constantes ni periódicas a través del tiempo. La señal exhibe un comportamiento caótico e impredecible, similar al observado en el ruido pirotécnico.

En la Tabla 4 se presentan los parámetros correspondientes a cada tipo de ruido adquirido y visualizado en la Figura 25, incluyendo la amplitud máxima, duración y distribución de energía la señal. Estos parámetros permiten comparar las características acústicas de los cuatro tipos de ruidos domésticos evaluados.

Tabla 4

Tabla de comparación de señales de ruido en el tiempo

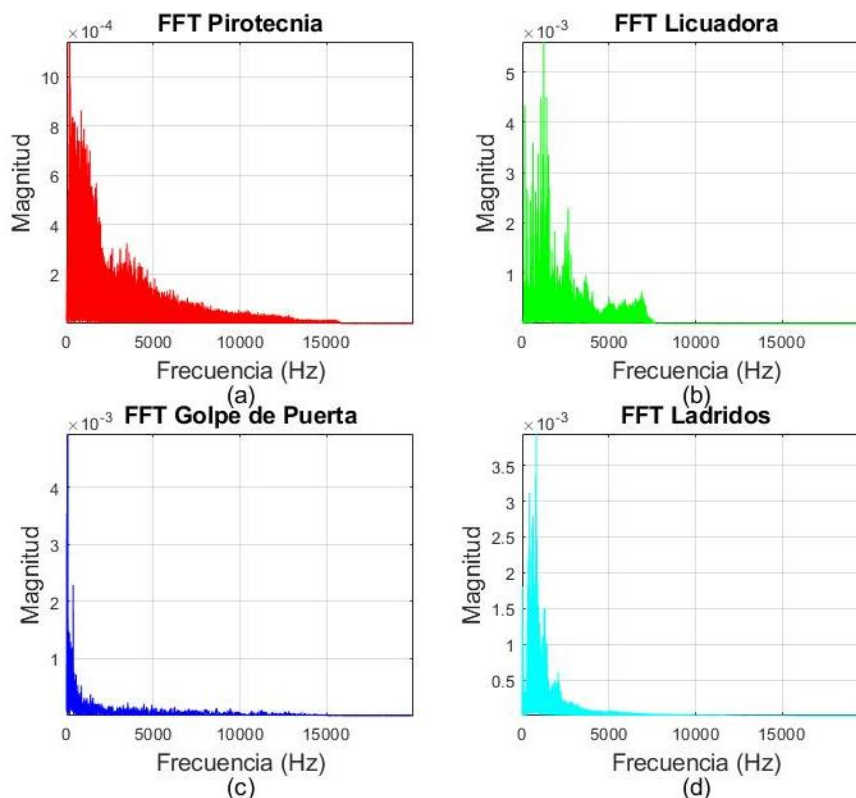
Ruidos	Amplitud máxima	Duración (segundos)	Distribución de energía de la señal
Ruido Pirotécnico	0.65	14.7	Variación de amplitud no uniforme e impredecible
Ruido de licuadora	0.8	12.2	Variación de amplitud continua y periódica
Ruido de golpe de puerta	1	4.9	Amplitud única
Ruido de ladridos	0.9	12.2	Variación de Amplitud no uniforme e impredecible

Nota. La tabla muestra la comparación de señales de ruido de acuerdo con la amplitud máxima, duración y distribución de energía de las señales a través del tiempo. Fuente: Elaboración Propia

Se procede a recopilar y evaluar las características de ruido doméstico de las cuatro señales en función de la frecuencia:

Figura 26

Señales domésticas en función de la frecuencia: (a) ruido pirotécnico, (b) ruido de licuadora (c) ruido de golpe de puerta (d) ruido de ladrido de perros.



Nota. El gráfico muestra los cuatro ruidos en función de la frecuencia y amplitud normalizada. Fuente: Elaboración Propia.

A partir de la Figura 26 se analizan individualmente las características espectrales de cada tipo de ruido adquirido:

- **Ruido pirotécnico:** En la Figura 26 (a) se observa un espectro de frecuencias amplio, que abarca desde 0 hasta 18 kHz. Este rango incluye componentes de baja frecuencia, asociado a las ondas de choque iniciales, así como componentes de alta frecuencia correspondientes a otros estallidos más agudos. Se observa una concentración de energía en las frecuencias bajas, especialmente por debajo de los 2000 Hz, donde resalta un pico de amplitud máximo en torno a los 200 Hz. Considerando estos datos, se puede afirmar que gran parte de la energía de ruido pirotécnico se encuentra en este rango frecuencial, lo cual es una característica de las frecuencias graves para propagarse a largas distancias. No obstante, se aprecia una disminución progresiva de la amplitud a partir de los 13kHz, reflejando una menor presencia de frecuencias altas.
- **Ruido de licuadora:** En la Figura 26 (b), se presenta un espectro de frecuencias que abarca un rango aproximado de 80 Hz a 8kHz, en el cual se evidencia una mayor concentración de energía en las frecuencias bajas y medias. Se observa un incremento notable en la amplitud de frecuencias comprendidas entre 150 y 1600 Hz, destacando un pico máximo en torno a los 1250 Hz. Así mismo, a partir de los 3000 Hz se registra una disminución de energía y con una caída de señal a partir de los 7000 Hz, lo que indica una cantidad mínima de componentes en alta frecuencia para este ruido.
- **Ruido de golpe de puerta:** En la Figura 26 (c), el rango de frecuencias cubre un intervalo que se encuentra desde los 0 Hz hasta los 10 KHz. La señal presenta una gran concentración de energía en las frecuencias graves, específicamente en el rango de 0 a 500 Hz. Dentro de este intervalo se observa un pico de amplitud máxima en torno a los 70 Hz, determinando que la mayor parte del contenido energético está asociado a su componente espectral de baja frecuencia. A partir de los 500 Hz, la señal de ruido presente una disminución significativa de la energía para el rango medio y alto del espectro de frecuencias.

- **Ruido de ladridos de perro:** En la Figura 26 (d), el espectro de frecuencia abarca un rango frecuencial desde 0 Hz a 7000 Hz. La mayor parte de la energía se encuentra concentrada en las frecuencias bajas y medias, específicamente en el rango de 0 Hz a 1500 Hz. Dentro de este intervalo, se observa un pico de amplitud máximo en torno a los 800 Hz. A partir de 2200 Hz, se presenta una disminución significativa de la energía espectral, lo que indica un bajo aporte al contenido acústico de alta frecuencia, además de tener impulsos breves y variaciones de amplitud para las frecuencias del ruido de ladridos.

En la Tabla 5 se observan los parámetros correspondientes a los rangos de frecuencia e intensidad sonora de cuatro tipos de ruidos domésticos evaluados. Además, se indicó el rango de frecuencias donde se concentra la mayor cantidad de energía.

Tabla 5

Tabla de comparación de señales de ruido en la frecuencia

Ruidos	Rango Frecuencial:	Intensidad Sonora Frecuencial
Ruido Pirotécnico	0 - 18 000 Hz	Mayor cantidad de energía en frecuencias menores a 2000Hz -
Ruido de licuadora	80 – 8000 Hz	Mayor cantidad de energía en el rango frecuencial de 150 a 1600 Hz
Ruido de golpe de puerta	0-10000 Hz	Mayor cantidad de energía en frecuencias menores a 500 Hz
Ruido de ladridos	0- 8000Hz	Mayor cantidad de energía en frecuencias menores a 1500 Hz

Nota. La tabla exhibe la comparación de señales de ruido de acuerdo al rango frecuencial e intensidad sonora de las señales de ruido en función de la frecuencia.
Fuente: Elaboración Propia

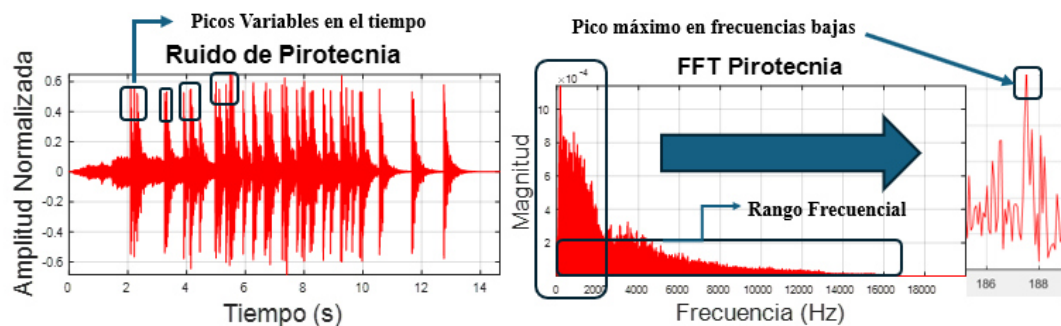
Luego de ello, se procede a analizar las características temporales y frecuenciales más importantes de los cuatro ruidos recopilados anteriormente para determinar el tipo de ruido al que pertenece, la cancelación frecuencial esperada, amplitud máxima frecuencial y la molestia en las personas con Trastorno del Espectro Autista según las curvas isofónicas y la sensibilidad del oído humano en el rango de frecuencias de 1000 Hz a 5000 Hz.

a) Análisis de ruido pirotécnico:

En la Figura 27 se observa que la señal presenta características temporales altamente variables, especialmente en los picos más altos, los cuales son altamente impredecibles y no estacionarios en el tiempo. En dominio de la frecuencia, se evidencia durante los estallidos prolongados una prevalencia de energía en el rango de baja frecuencia, resaltando un pico máximo en 187 Hz. Debido a la distribución espectral y la presencia de energía en un rango determinado de frecuencias, este tipo de ruido puede clasificarse como un ruido de banda ancha con dificultad de atenuación para un sistema de cancelación activa. Además, según las curvas isofónicas, presenta una mayor sensibilidad para las personas con TEA en las frecuencias mayores a 1000 Hz y menores a 2000 Hz.

Figura 27

Características visuales de ruido pirotécnico



Nota. En el gráfico mostrado se observan las características en el tiempo y frecuencia para el ruido pirotécnica. Fuente: Elaboración Propia

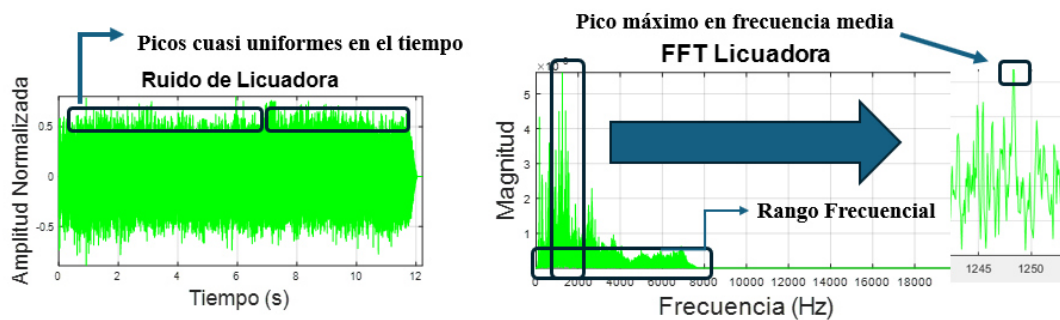
b) Análisis de ruido licuadora

En la Figura 28 se visualiza que la señal presenta características periódicas y altamente predecibles a lo largo del tiempo, con una amplitud de picos cuasi uniformes en toda su duración. En el dominio de la frecuencia, exhibe un rango limitado, con un pico máximo de 1248 Hz dentro del rango de frecuencias medias. Por lo tanto, este tipo de ruido se clasifica como de banda limitada y

de carácter continuo, con poca dificultad de atenuación para un sistema de cancelación activo. Además, según las curvas isofónicas, presenta una mayor sensibilidad para las personas con TEA en las frecuencias mayores a 1000 Hz y menores a 1600 Hz.

Figura 28

Características visuales de ruido de licuadora



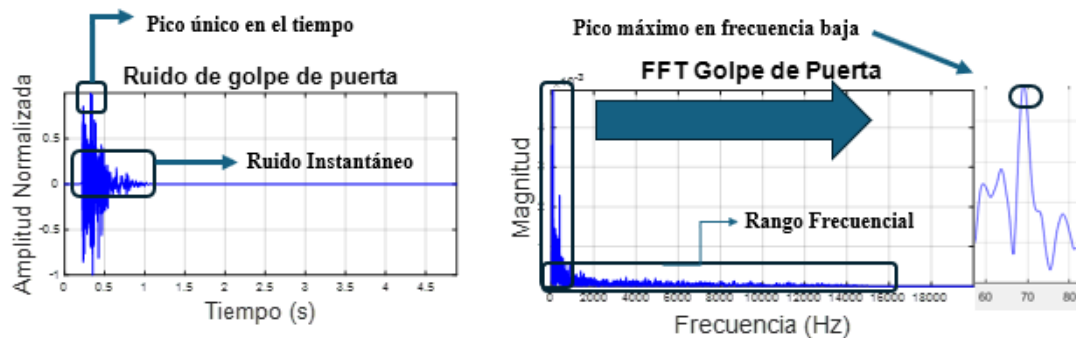
Nota. En el gráfico mostrado se observan las características en el tiempo y frecuencia para el ruido de licuadora. Fuente: Elaboración Propia.

c) Análisis de ruido en golpe de puerta.

En la Figura 29, la señal presenta una característica energética e irrepetible a lo largo del tiempo, dado que posee una gran amplitud en un instante de tiempo. En el dominio de la frecuencia, se presenta una característica impulsiva, evidenciada por un pico de amplitud máxima en una frecuencia de 69 Hz, asociada a una acumulación de energía en el espectro de bajas frecuencias. Además, el ancho de banda se concentra en una zona específica, indicando una distribución del espectro limitada. Por lo tanto, este ruido se clasifica como de banda limitada y de carácter impulsivo con dificultad media de atenuación para un sistema de cancelación activa debido a la rapidez con la que se desarrolla el ruido. Además, según las curvas isofónicas, presenta menor sensibilidad para las personas con TEA en las frecuencias menores a 500 Hz, pero debido a la amplitud máxima de la señal en 69 Hz, esta puede llegar a ser percibido y perjudicial a las personas que presentan una mayor hipersensibilidad auditiva.

Figura 29

Características visuales de ruido de golpe de puerta.



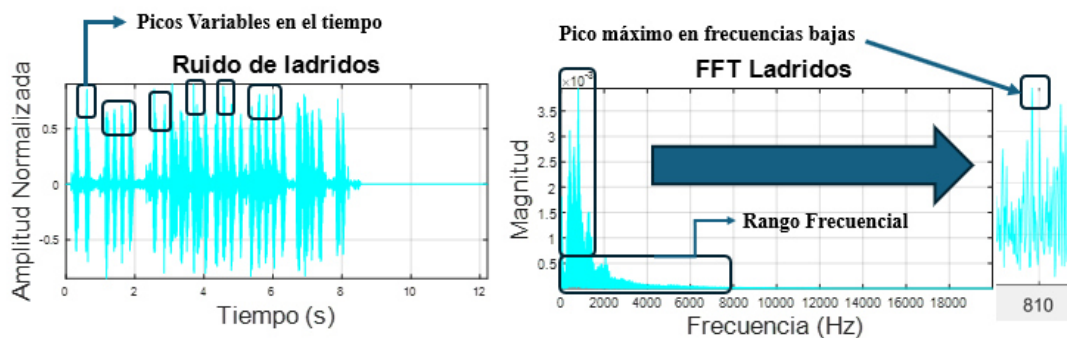
Nota. En el gráfico mostrado se observan las características en el tiempo y frecuencia para el ruido de golpe de puerta. Fuente: Elaboración Propia.

d) Análisis de ruido de ladridos

En la Figura 30, la señal presenta características no periódicas y variables en cada ladrido, lo que la hace altamente impredecible, mostrando un comportamiento estocástico en el dominio del tiempo. En el dominio de la frecuencia, su rango se extiende hasta los 8000 Hz, con una mayor concentración de energía en las bandas medias y bajas, destacando un pico de amplitud en la frecuencia de 808 Hz. Por lo tanto, este ruido se clasifica como de banda ancha, con una moderada dificultad de atenuación. Además, según las curvas isofónicas, presenta una mayor sensibilidad para las personas con TEA en las frecuencias mayores a 1000 Hz y menores a 1500 Hz.

Figura 30

Características visuales de ruido de ladridos



Nota. En el gráfico mostrado se observan las características en el tiempo y frecuencia para el ruido de ladridos. Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 6 se aprecian frecuencias de ruido que pueden llegar a afectar a las personas con TEA, una posible cancelación frecuencial, la amplitud máxima frecuencial percibida en cada una de las gráficas y el tipo de ruido de las cuatro señales analizadas previamente.

Tabla 6

Tabla comparativa de señales de ruido según análisis de características

Ruidos	Tipo	Amplitud máx. frecuencial	Cancelación frecuencial	Molestia en TEA
Ruido Pirotécnico	Banda Ancha	187 Hz	Desempeño limitado	Muy alto (1000 Hz - 2000 Hz)
Ruido de licuadora	Banda limitada y continua	1248 Hz	Desempeño esperado	Medio (1000 Hz a 1600 Hz)
Ruido golpe de puerta	Banda limitada e impulsiva	69 Hz	Desempeño aceptable	Bajo (0 Hz-500Hz)
Ruido de ladridos	Banda Ancha	808 Hz	Desempeño limitado	Alto (1000 Hz a 1500 Hz)

Nota. La tabla presenta la comparación de las señales de ruido de acuerdo con el tipo de ruido, amplitud máxima frecuencial, posible cancelación frecuencial y molestia en personas con TEA. Fuente: Elaboración Propia.

5.2. Modelamiento del sistema de cancelación de ruido.

5.2.1. Selección del sistema de cancelación de ruido activo

- **Selección de micrófonos**

Para un sistema de tipo Feedforward es indispensable el uso de dos micrófonos: un micrófono de referencia, encargado de detectar el ruido previo a su alcance del usuario, y un micrófono de error, ubicado después del punto de cancelación, encargado de medir el ruido residual tras el proceso de cancelación y propagación, además de utilizarse para el ajuste de coeficientes del filtro, sin embargo, la señal de error captada no retroalimenta a la señal de entrada directamente ni regresa a la fuente de generación de la señal antiruido.

Para un sistema de tipo FeedBack, se hace uso de un solo micrófono de error situado después del área de cancelación, encargado de captar el ruido residual y retroalimentar el comportamiento del sistema. En este caso, la señal de error influye directamente al controlador, modificando la fuente de señal antiruido en tiempo real.

- **Análisis de ruido a cancelar**

A partir del análisis de los tipos de ruido evaluados previamente (ruido de banda ancha, ruido de banda limitada, ruido impulsivo y ruido continuo), se evidencia una gran carga de energía en frecuencias graves y medias. Este aspecto es un factor determinante para el diseño del sistema de cancelación de ruido ya que influye en la efectividad del control.

En un sistema de cancelación Feedforward, que emplea un micrófono de referencia, resulta efectivo particularmente para la atenuación de ruidos de banda ancha, como la pirotecnia y los ladridos, ya que permite anticiparse a la llegada del ruido al usuario. Además, al utilizar el micrófono de error, se actualizan los coeficientes del filtro adaptativo mejorando la respuesta a ruidos de banda ancha frente a ruidos de banda limitada, como el producido por el motor de licuadora, permitiendo una corrección continua de la señal de cancelación para ambos tipos de ruido.

Por otro lado, para un sistema FeedBack, se emplea un solo micrófono acústico de error, ubicado en el punto de cancelación. Esta configuración reduce a posibilidad de filtración de señal antiruido hacia el sistema, ya que no es posible captar anticipadamente el ruido debido a que no existe un micrófono de referencia. Sin embargo, al no contar con una señal de referencia, el sistema reacciona ante el ruido presente, lo cual limita la capacidad de respuesta ante señales transitorias y variables. Esta condición restringe su efectividad en ruidos estables o de banda limitada en un rango determinado de frecuencias y dificulta su desempeño ante señales de banda ancha como la pirotecnia o ladridos, donde es muy probable presentar problemas de estabilidad. Aun así, este sistema es útil en aplicaciones donde no es posible obtener una señal de

referencia confiable como el control de ruido en entornos industriales con múltiples fuentes de ruido y complejos caminos de propagación

- **Procesamiento del sistema**

En un sistema Feedforward, se requiere mayor complejidad a nivel de hardware y procesamiento, ya que se emplea un micrófono de referencia para capturar anticipadamente la señal de ruido que es muestreada y procesada mediante un algoritmo adaptativo que genera un filtro FIR, que a su vez se encarga de la construcción de una señal antiruido. Además, utiliza un micrófono de error para proporcionar retroalimentación indirecta continua, permitiendo ajustar iterativamente los coeficientes del filtro para una correcta cancelación de ruido.

Por el contrario, un sistema FeedBack requiere una menor capacidad de procesamiento y hardware, ya que se basa únicamente en el ajuste de la señal recopilada por el micrófono de error. Esta señal se utiliza para ajustar la respuesta del sistema en tiempo real, lo que simplifica el diseño y exigencia de procesamiento, no obstante, limita la cancelación frente a ciertos tipos de ruido.

La Tabla 7 presenta una comparación de las características previamente analizadas para los sistemas de cancelación Feedforward y FeedBack, con el objetivo de identificar cuál resulta más adecuado para el diseño de cancelación de ruido activo para personas con TEA.

Tabla 7

Comparativa de sistemas de cancelación Feedforward y FeedBack

Características	Sistema Feedforward	Sistema FeedBack
Selección y distribución de micrófonos	Micrófono de Referencia y Micrófono de Error	Micrófono de Error.
Tipo de Ruido	Ruido de Banda Ancha y Banda Limitada	Ruido de Banda Limitada Ruido de múltiples fuentes
Procesamiento	Mayor complejidad de Hardware y Procesamiento	Menor capacidad de Procesamiento

Nota. La tabla denota la comparación de los sistemas Feedforward y FeedBack según la selección y distribución de micrófonos, tipos de ruido y procesamiento necesario. Fuente: Elaboración Propia.

Tras analizar y comparar las características relevantes de ambos sistemas en la Tabla 7, se determinó que el sistema más adecuado para el desarrollo de esta aplicación es el sistema Feedforward. Aunque el sistema Feedforward presenta una mayor complejidad de procesamiento, ofrece un desempeño superior al sistema FeedBack en la cancelación de ruidos tanto de banda ancha como de banda limitada por la predicción de ruido captado. Además, el uso estratégico de 2 micrófonos (micrófono de error y de referencia) permite una detección más precisa del ruido y mayor capacidad de generación de una señal antiruido comparado al uso de un solo micrófono o sensor de señales para un sistema Feedback.

Considerando la ubicación de los micrófonos en el auricular y el uso de una sola señal antiruido, se define una configuración de canal único (SISO) (Kuo & Morgan, 1996), la cual aporta eficiencia y simplicidad de la aplicación, para así reducir la complejidad computacional y el consumo de energía, aspectos importantes para una futura implementación.

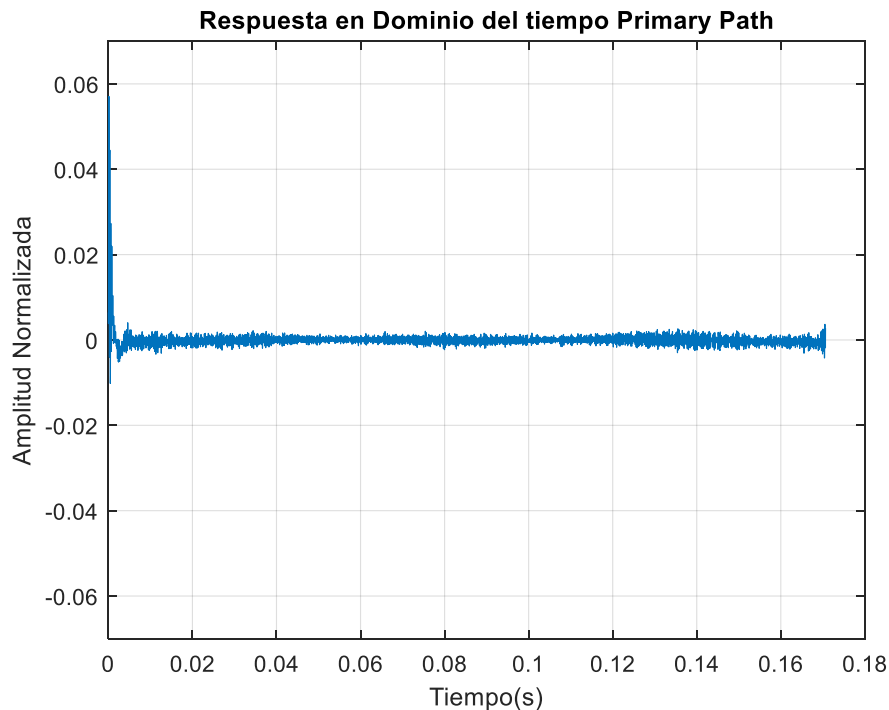
5.2.2. Incorporación de caminos primarios y secundarios

- **Camino de propagación primaria**

La respuesta al impulso en el tiempo correspondiente a la propagación del camino primario se muestra en la Figura 31, con una duración aproximada de 0.17 segundos. Dónde se puede observar la mayor parte de la energía acústica concentrada en los primeros 0.02 segundos, lo cual indica una respuesta rápida del sistema ante estímulos sonoros. Además, se observa una amplitud inicial de aproximadamente 0.06 que va disminuyendo progresiva y rápidamente hasta estabilizarse, lo que denota un comportamiento de amortiguación rápida. Esta característica resulta fundamental para el rendimiento del sistema de cancelación, ya que permite responder de manera efectiva a cambios bruscos en el ruido al comportarse como un filtro de la señal de entrada, facilitando una atenuación eficiente.

Figura 31

Respuesta al impulso de camino primario.

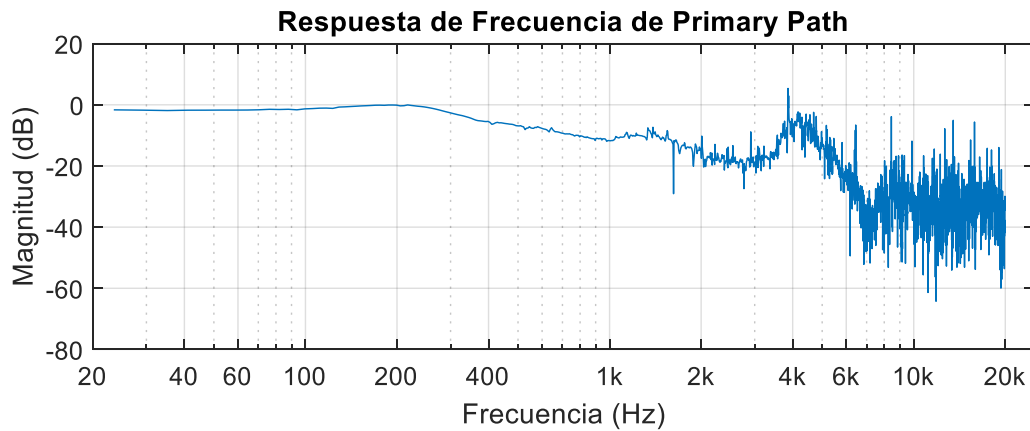


Nota. El gráfico representa una señal en el tiempo de la respuesta del camino de propagación primaria acústica. Fuente: Elaboración Propia

La respuesta de la señal de propagación primaria en función de la frecuencia se puede observar en la Figura 32. En esta gráfica se observa una respuesta plana con una caída de aproximadamente 600 Hz, lo que indica que el sistema no introduce pérdidas significativas en frecuencias bajas, permitiendo que estas sean procesadas de forma eficiente por el sistema de cancelación de ruido activo. Sin embargo, a partir de los 600 Hz hasta los 4 KHz se evidencia un aumento de variaciones aleatorias, reduciendo la efectividad de su funcionamiento en el sistema, ya que no se transmiten de manera eficiente estas frecuencias hacia el sistema de cancelación de ruido activo. Además, para frecuencias superiores a 4 KHz, se evidencia un aumento excesivo de variaciones de frecuencia que se atenúan con gran rapidez, dificultando aún más el proceso de cancelación de ruido para altas frecuencias debido a la limitada transmisión de estas por el camino primario.

Figura 32

Respuesta en función de la frecuencia de camino primario.



Nota. La gráfica representa el comportamiento acústico del camino de propagación primaria en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia

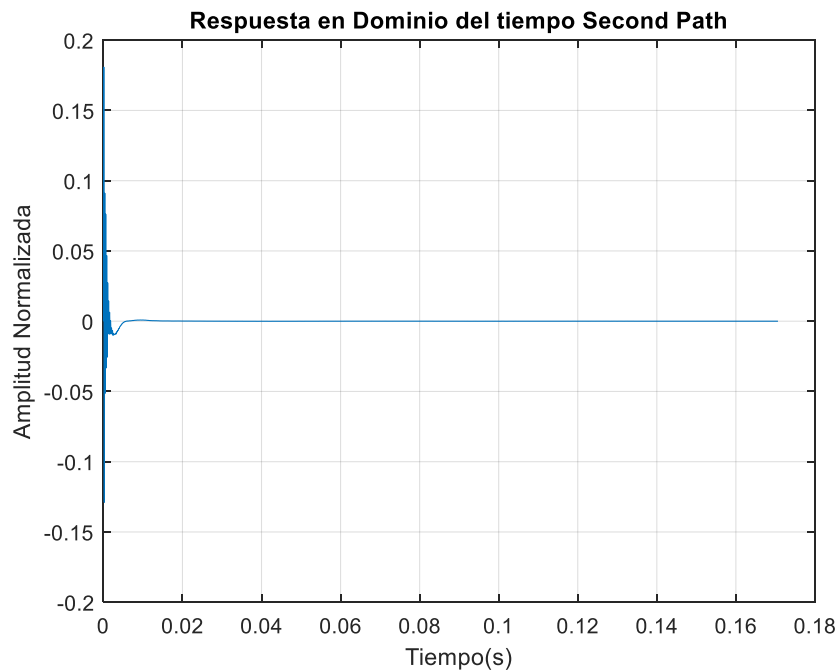
- **Camino de propagación secundaria**

Para esta investigación se empleó un modelo que representa el comportamiento acústico en auriculares, tomando como referencia la base de datos con la respuesta impulso de la ruta de propagación secundaria que indica el comportamiento acústico desde la señal antiruido al micrófono de error.

La respuesta al impulso de la señal de propagación secundaria (Secondary Path) en función del tiempo se muestra en la Figura 33, donde se aprecia un pico inicial pronunciado que decae en menos de 0.02 segundos. Este comportamiento indica un sistema con respuesta rápida y sin efectos prolongados de eco o resonancias en el tiempo, lo que representa que el camino secundario no introduce distorsiones significativas en la señal de cancelación. Además, la respuesta al impulso tiene una alta amplitud inicial seguida de un amortiguamiento rápido y sin oscilaciones, lo que minimiza la posibilidad de una retroalimentación no deseada o una modificación del sonido breve y controlada. Esta característica es esencial para garantizar que la señal antiruido generada llegue al micrófono de error sin degradación en la señal ni perturbaciones que distorsionen el ruido.

Figura 33

Respuesta al impulso de camino secundario.

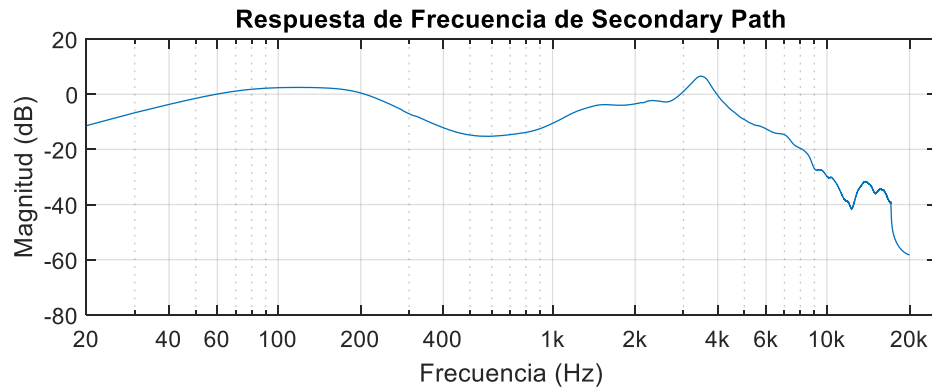


Nota. El gráfico representa el comportamiento acústico del camino de propagación secundario en función del tiempo. Fuente: Elaboración Propia

La respuesta al impulso en función de la frecuencia del camino de propagación secundaria se muestra en la Figura 34. En ella, se observa que la presión sonora en bajas frecuencias (menores a 200 Hz) presentan un aumento progresivo y una estabilidad relativamente plana, lo cual resulta útil para la cancelación de ruidos graves en el sistema de cancelación de ruido activo. En el intervalo de frecuencias medias entre 200 a 1 KHz, se observa una ligera atenuación en este rango de frecuencias, denotando una pequeña pérdida de efectividad para frecuencias que se encuentren en este rango. Además, en las frecuencias medias que se encuentran entre 1 KHz a 3 KHz, el sistema recupera una respuesta más plana y uniforme, permitiendo un correcto desempeño del sistema de cancelación en esta banda. Sin embargo, a partir de 3 KHz se observa un pico abrupto y un decaimiento rápido en la respuesta, indicando que el sistema tiene baja sensibilidad a frecuencias altas. Por lo tanto, este camino de propagación secundaria limita la capacidad del sistema para su aplicación en entornos con ruidos agudos de amplio espectro.

Figura 34

Respuesta en frecuencia de camino secundario



Nota. El gráfico representa el comportamiento acústico del camino de propagación secundario en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia.

- **Modelado del camino de propagación secundaria**

Como parte fundamental del diseño del sistema de cancelación, se procedió al modelado del camino de propagación secundaria. Este modelo es esencial para una correcta implementación del algoritmo FxLMS. Este modelado se realizó mediante un filtro adaptativo NLMS para la estimación del camino secundario, al ajuste del sistema se realizó de la siguiente manera:

El ajuste de coeficientes de la respuesta al impulso estimada será modelado como $S'(z)$, que posteriormente se utilizó dentro del algoritmo FxLMS. Debido a la longitud considerable de valores de la respuesta al impulso que posee el camino de propagación secundaria, se empleó la ecuación 5 de algoritmo NLMS para adaptar los coeficientes del filtro FIR. Se definió la longitud de coeficientes del filtro adaptativo $S'(z)$ mediante la ecuación 21.

$$\text{Longitud del Filtro} \geq T_i * F_s \quad (21)$$

Donde:

T_i es la duración de la respuesta al impulso del camino secundario (s)

F_s es la frecuencia de muestreo (Hz)

$$L \geq 0.02 * 48000$$

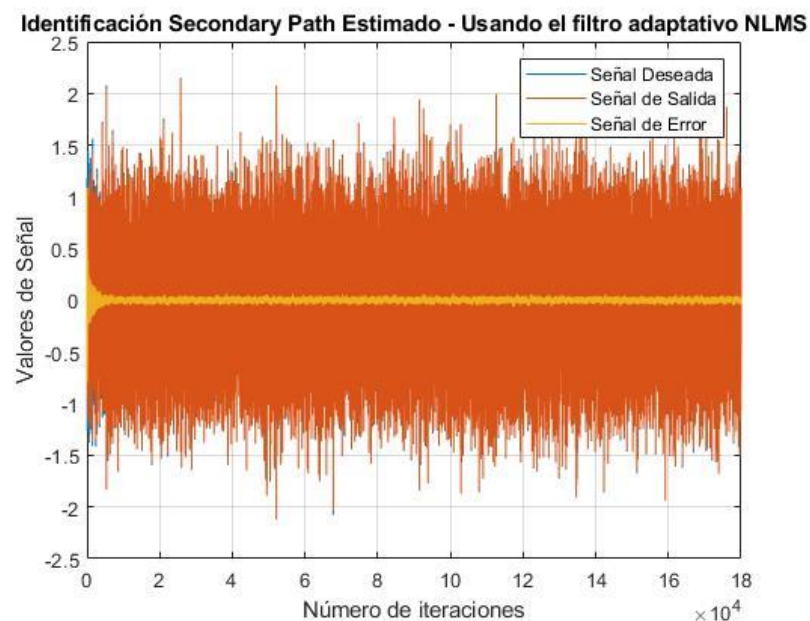
$$L \geq 960$$

Por lo tanto, se determina un tamaño de longitud $L=960$ valores para el filtro adaptativo. Así mismo, se define el valor de del coeficiente de convergencia μ , el cual debe encontrarse dentro del intervalo de valores entre 0 y 1 para garantizar la estabilidad del algoritmo, optimizar el rendimiento del proceso de adaptación y acelerar la velocidad de convergencia del camino de propagación secundaria.

En este caso se seleccionó un valor de convergencia de $\mu=0.3$ para llevar a cabo la estimación de la señal. La señal utilizada para la estimación del camino secundario corresponde a un ruido blanco aleatorio con una duración de 3.75 segundos, lo cual permite evaluar el sistema a lo largo del espectro de frecuencias sin añadir realces o atenuaciones. En la Figura 35 se presenta la comparación entre la señal original del camino secundario $S(z)$, la señal estimada del camino secundario $S'(z)$ y el error de adaptación. Donde se observa que el algoritmo logra un ajuste de convergencia en las primeras 1000 iteraciones aproximadamente, lo que demuestra que el modelo adaptativo es capaz de estimar la respuesta del camino secundario original.

Figura 35

Estimación iterativa de camino secundario.

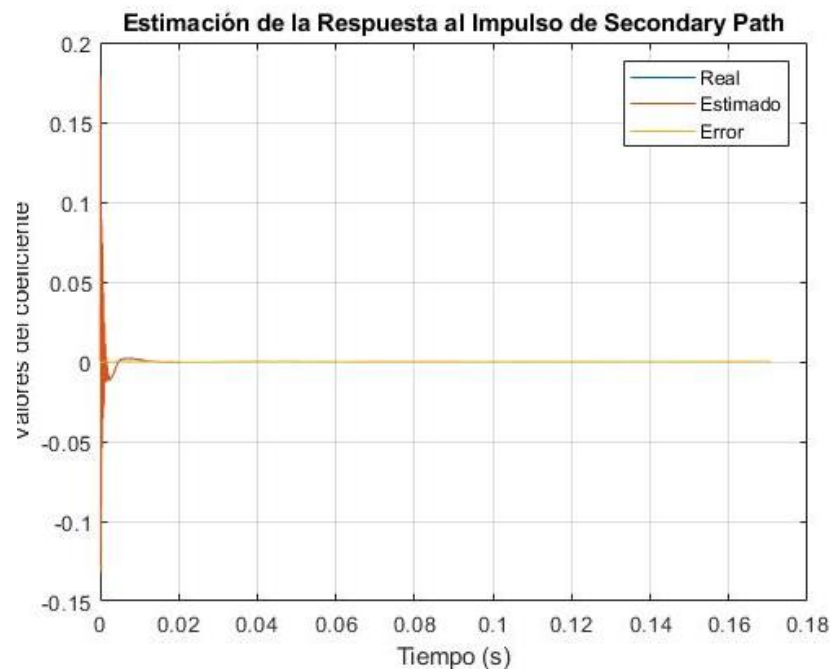


Nota. El gráfico muestra la estimación iterativa del camino de propagación estimado al comparar la señal deseada a obtener. Fuente: Elaboración Propia

De igual manera, es necesario analizar la estimación del camino de propagación secundaria en función de su respuesta al impulso, comparando tanto la señal original y la estimada, así como el error de respuesta asociado a dicha estimación. Tal como se muestra en la Figura 36, la respuesta al impulso estimada presenta una alta similitud con la respuesta original, lo que indica que se logró replicar con gran precisión el comportamiento del camino de propagación secundaria.

Figura 36

Estimación de respuesta al impulso de camino secundario



Nota. El gráfico representa la comparativa de respuesta al impulso de los caminos de propagación estimado y real, así como el error mínimo entre ambas. Fuente: Elaboración Propia.

5.3. Diseño y simulación del sistema en base al coeficiente de convergencia

5.3.1. Diseño del sistema de cancelación feedforward FxLMS

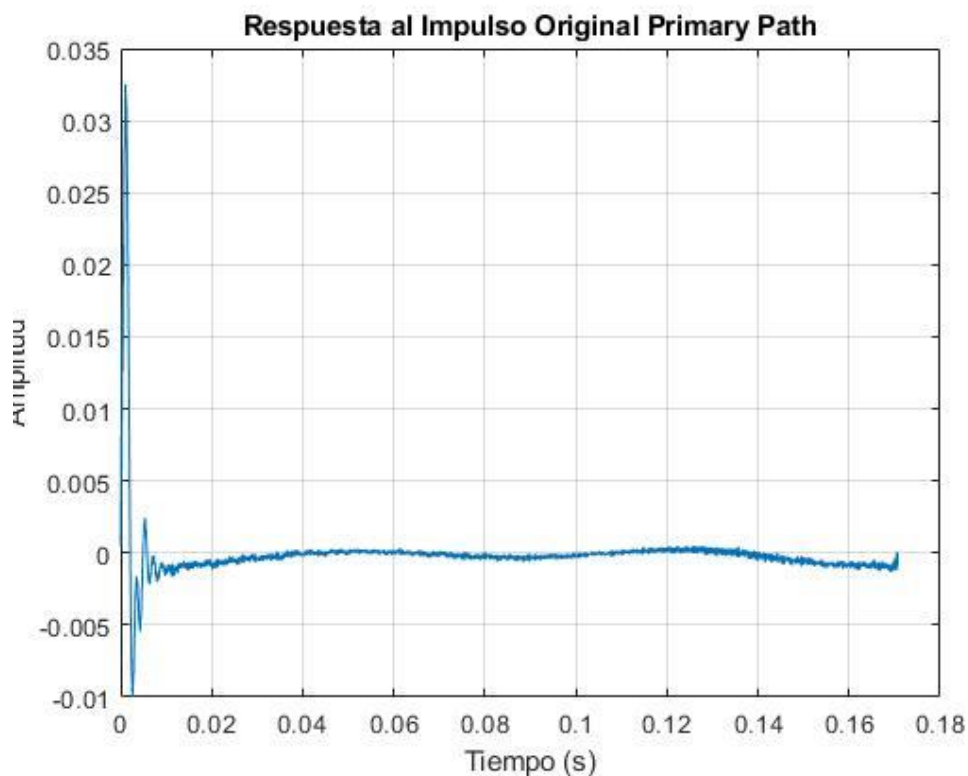
De acuerdo con la metodología de diseño del sistema de cancelación de ruido activo, una vez obtenida la señal de referencia de ruido $x(k)$ mediante la adquisición y

recopilación de datos en formato .wav, y habiendo estimado el camino de propagación secundaria a través del algoritmo NLMS, es necesario aplicar un filtrado al camino de propagación primaria para un mejor desempeño del sistema, Asimismo, es fundamental determinar un coeficiente de convergencia adecuado que permita un ajuste preciso del sistema adaptativo.

- **Camino de propagación primaria.** Se implementó un filtro pasa bajo de orden 12, con una frecuencia de corte de 600 Hz y una frecuencia de muestreo de 48kHz, para enfocar el desempeño del sistema en frecuencias bajas. La respuesta al impulso filtrada en frecuencias bajas se muestra en la Figura 37.

Figura 37

Respuesta al impulso camino primario filtrado en frecuencias bajas.



Nota. El gráfico representa la respuesta al impulso del camino de propagación primaria para frecuencias bajas menores a 600 Hz. Fuente: Elaboración Propia

Además, se realiza el ajuste de los parámetros del filtro adaptativo para tener una correcta cancelación en el sistema

- **Ajuste de parámetros del filtro adaptativo FxLMS.** En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos al usar un filtro adaptativo con una longitud de 960 coeficientes y variar el coeficiente de convergencia del algoritmo FxLMS. Esta variación de tasa de convergencia se realizó en el software Excel y se aplicó a los ruidos de pirotecnia, licuadora, golpe de puerta y ladridos, con el fin de identificar el valor óptimo del coeficiente que brinde una respuesta eficiente y estable del sistema. Este análisis permite seleccionar el coeficiente adecuado según el tipo de ruido y priorizar la estabilidad del sistema sin comprometer la velocidad de convergencia.

Tabla 8

Comparación de estabilidad de coeficiente de convergencia

Ruido	$\mu = 0.0001$	$\mu = 0.001$	$\mu = 0.007$	$\mu = 0.01$	$\mu = 0.1$
Pirotecnia	Estable	Estable	Estable y veloz	Inestable	Inestable
Licuadora	Estable	Estable	Estable y veloz	Estable y veloz	Inestable
Golpe de Puerta	Estable	Estable	Estable y veloz	Estable y veloz	Inestable
Ladridos	Estable	Estable	Estable y veloz	Inestable	Inestable

Nota. La tabla muestra la comparativa del coeficiente de convergencia para los cuatro tipos de ruido, así como la estabilidad y velocidad del sistema de cancelación. Fuente; Elaboración Propia.

Por esta razón, se seleccionó un coeficiente de adaptación de $\mu = 0.007$, ya que este valor demostró ser óptimo para cancelar una mayor cantidad de ruido aleatorio de banda ancha, sin comprometer la estabilidad del sistema debido a una convergencia acelerada.

Posteriormente, se procede a inicializar los vectores del algoritmo para el almacenamiento de las señales de entrada, de error y de los coeficientes del filtro adaptativo. Estos vectores se actualizan dentro de un bucle for, donde en cada iteración se aplica la ecuación (17) del algoritmo FxLMS para actualizar dinámicamente los coeficientes del filtro y mejorar continuamente la cancelación de ruido en función del ruido a procesar.

A partir de los parámetros definidos del algoritmo FxLMS, y considerando un coeficiente de convergencia de $\mu = 0.007$, se llevó a cabo el diseño del sistema de cancelación activa de ruido.

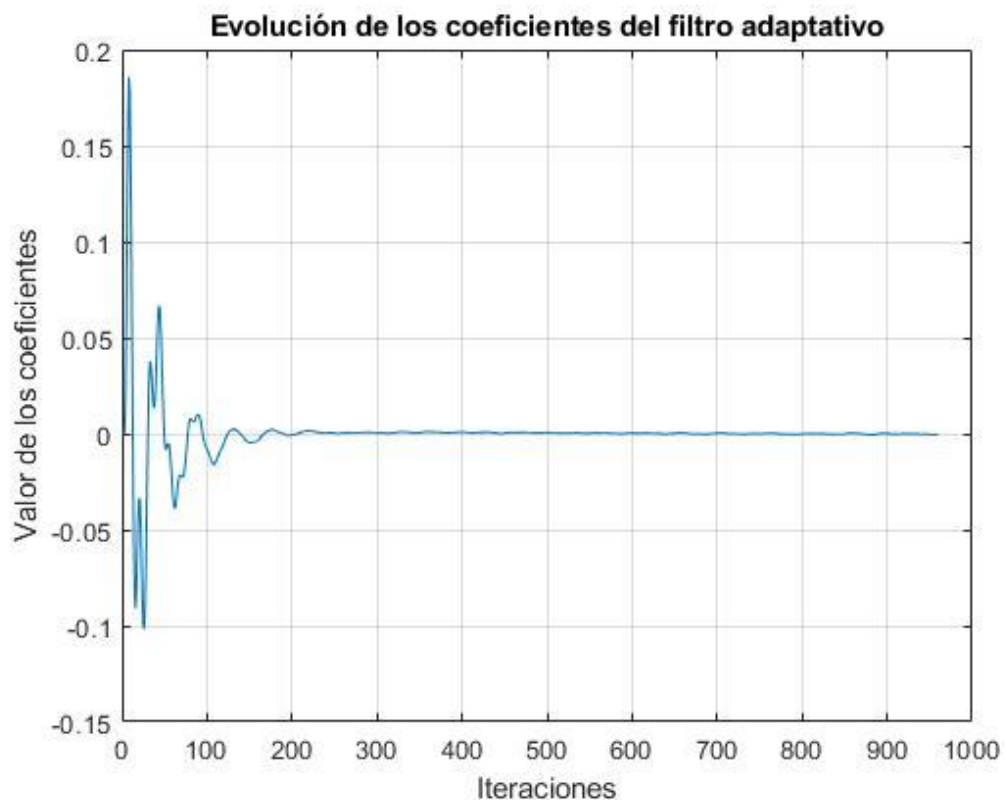
5.3.2. Simulación y validación del diseño del sistema

- Simulación y validación del sistema para la frecuencia de 1 KHz

En la Figura 38, se muestra la evolución de los coeficientes del filtro adaptativo, los cuales alcanzan una estabilidad aproximada dentro de las primeras 200 iteraciones. Este comportamiento refleja una rápida convergencia, permitiendo una respuesta eficiente en la cancelación de ruido.

Figura 38

Evolución de coeficientes del filtro adaptativo.

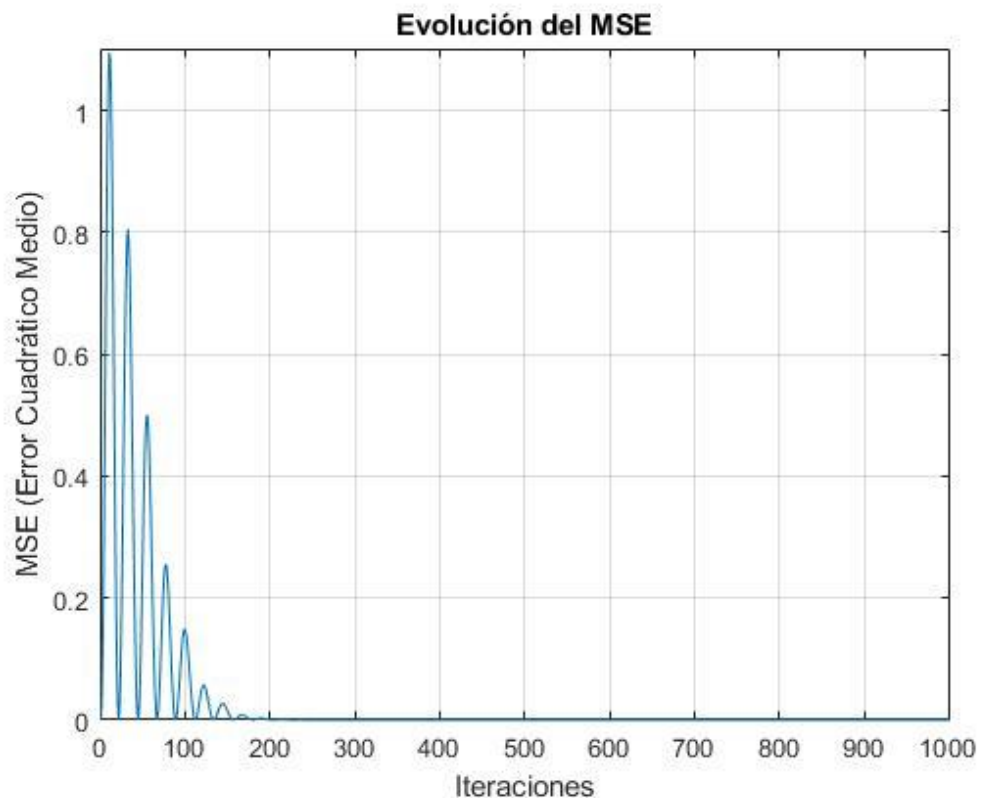


Nota. El gráfico representa la estabilización del filtro adaptativo para una frecuencia estándar de 1 kHz. Fuente: Elaboración Propia

Así mismo, en la Figura 39 se observa la evolución del error cuadrático medio (MSE), el cual indica la rapidez con la que disminuye el error a lo largo de las iteraciones. El sistema logra alcanzar un MSE de 0.000144, lo cual indica una cancelación de ruido efectiva y un adecuado proceso de aprendizaje del algoritmo adaptativo. Además, se evidencia una convergencia rápida en las primeras 200 iteraciones, lo que refuerza la eficiencia del diseño y parámetros del algoritmo.

Figura 39

Error cuadrático medio a través del tiempo



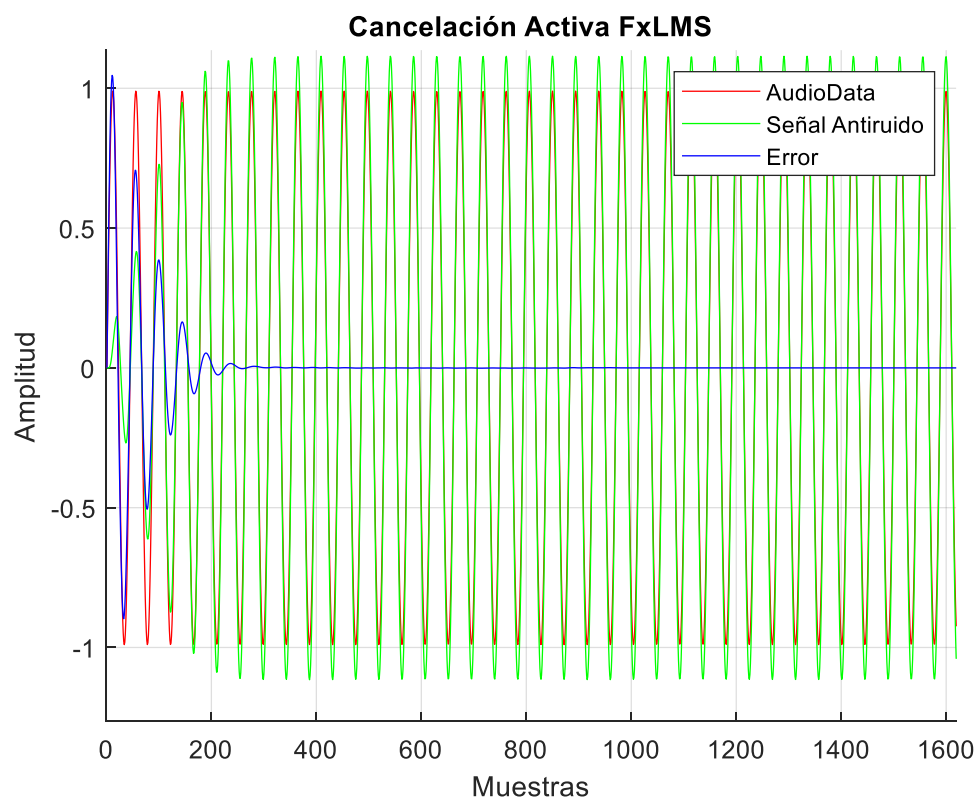
Nota. El gráfico representa el error cuadrático medio generando una estabilidad en las primeras 200 iteraciones para una señal sinusoidal. Fuente: Elaboración propia

Para validar el desempeño del sistema frente a señales periódicas, se utiliza una señal de 1 kHz como entrada. El objetivo del ingreso de esta frecuencia procesada por el sistema es observar la capacidad de adaptarse y cancelar la señal con rapidez y precisión. En la Figura 40, se muestra la cancelación activa de una señal sinusoidal, donde se evidencia una respuesta rápida del sistema a partir de las 200 iteraciones,

permitiendo una cancelación efectiva en el tiempo para una señal en tono puro de 1 KHz con un error que va disminuyendo progresivamente hasta estabilizarse en las primeras 250 iteraciones aproximadamente.

Figura 40

Señal sinusoidal atenuada en el tiempo.

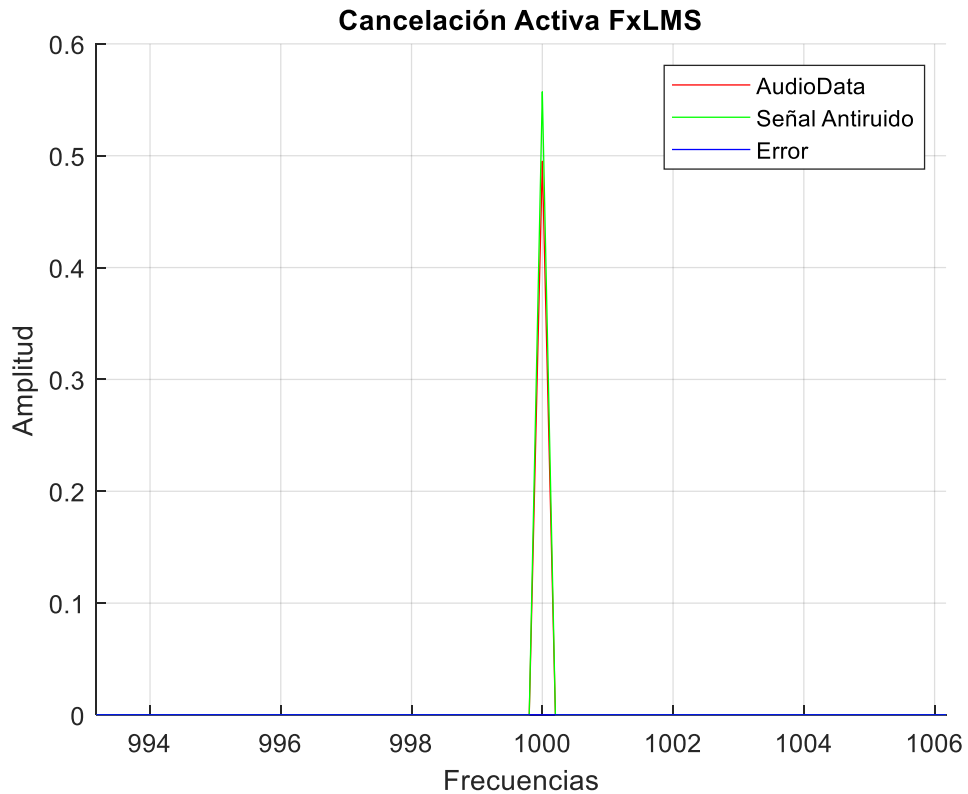


Nota. La gráfica representa la cancelación activa de una señal sinusoidal en el tiempo.
Fuente: Elaboración Propia.

De igual manera, se valida el desempeño del sistema de cancelación activa en dominio de la frecuencia, observándose una reducción significativa del ruido original, generando un error mínimo en su desempeño, tal como se muestra en la Figura 41, evidenciando el correcto funcionamiento del sistema FxLMS en función de la frecuencia para una señal de tono puro. Esta validación permite asegurar el funcionamiento del sistema para tonos puros menores a 1000 Hz.

Figura 41

Señal sinusoidal atenuada en función de la frecuencia



Nota. . La gráfica representa la cancelación activa de una señal sinusoidal en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia.

Se concluye que el sistema de cancelación de ruido activo diseñado permite una atenuación considerable tanto en función del tiempo como de la frecuencia. Además, demuestra una respuesta rápida y estable debido al uso del coeficiente de convergencia de $u=0.007$, optimizado para los diferentes tipos de ruido doméstico (pirotecnia, licuadora, golpe de puerta y ladridos) que pueden afectar negativamente a personas con TEA.

- **Simulación y validación del sistema de cancelación de ruidos domésticos**

Se llevó a cabo la simulación del sistema de cancelación de ruido activo, aplicándolo a los cuatro ruidos previamente capturados. El objetivo principal es evaluar el desempeño del sistema frente a estos ruidos domésticos que pueden generar molestias

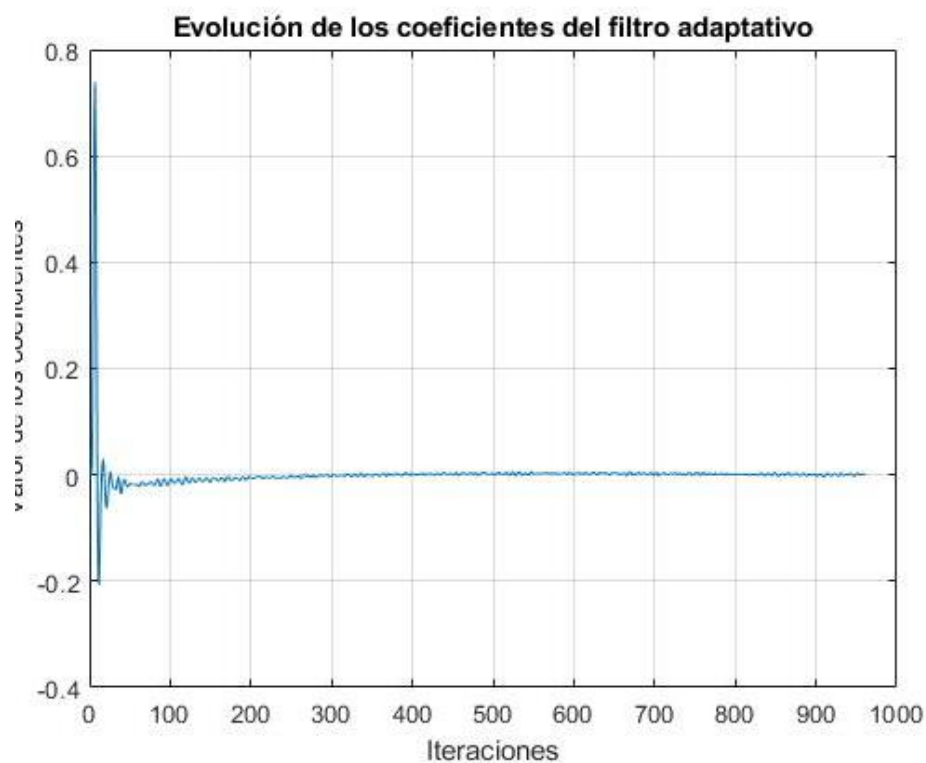
sensoriales auditivas en personas con Trastorno del Espectro Autista, observando su capacidad de atenuación y estabilidad.

a) Ruido pirotécnico

En la Figura 42 se muestra la evolución temporal de los coeficientes del filtro adaptativo frente al ruido pirotécnico. Se observa que el sistema alcanza una rápida estabilización en las primeras 100 iteraciones, lo cual evidencia una respuesta rápida en convergencia y capacidad de adaptación del filtro adaptativo ante este tipo de señal impulsiva y de banda ancha.

Figura 42

Evolución de coeficientes del filtro adaptativo del ruido pirotécnico.



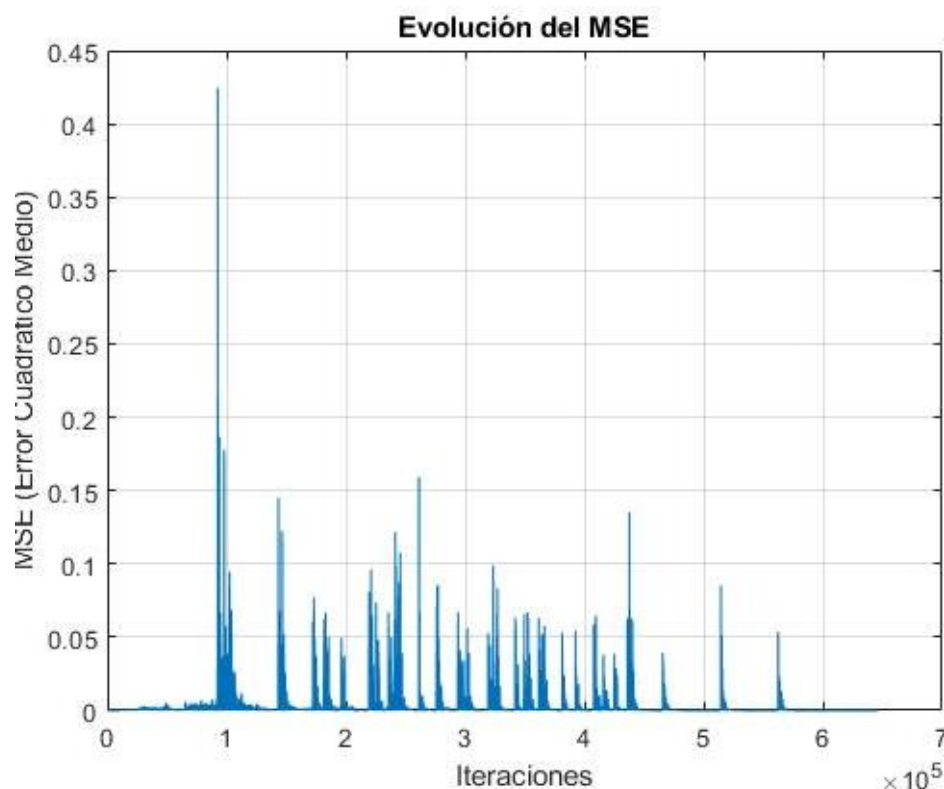
Nota. La gráfica representa como los coeficientes del filtro adaptativo para el ruido pirotécnico reaccionan rápidamente ante las primeras iteraciones. Fuente: Elaboración Propia

De igual manera, en la Figura 43 se observa la evolución del error cuadrático medio (MSE) a lo largo de las iteraciones indicando una disminución progresiva. El sistema logra alcanzar un MSE de 0.000508, lo cual indica una cancelación de ruido efectiva.

Este resultado indica que el sistema de cancelación activo está adaptándose de manera efectiva al ruido pirotécnico. Si bien, no presenta una cancelación inmediata como la señal sinusoidal, se evidencia un aprendizaje a medida que la señal se desarrolla en el tiempo.

Figura 43

Evolución de MSE del ruido de pirotecnia.

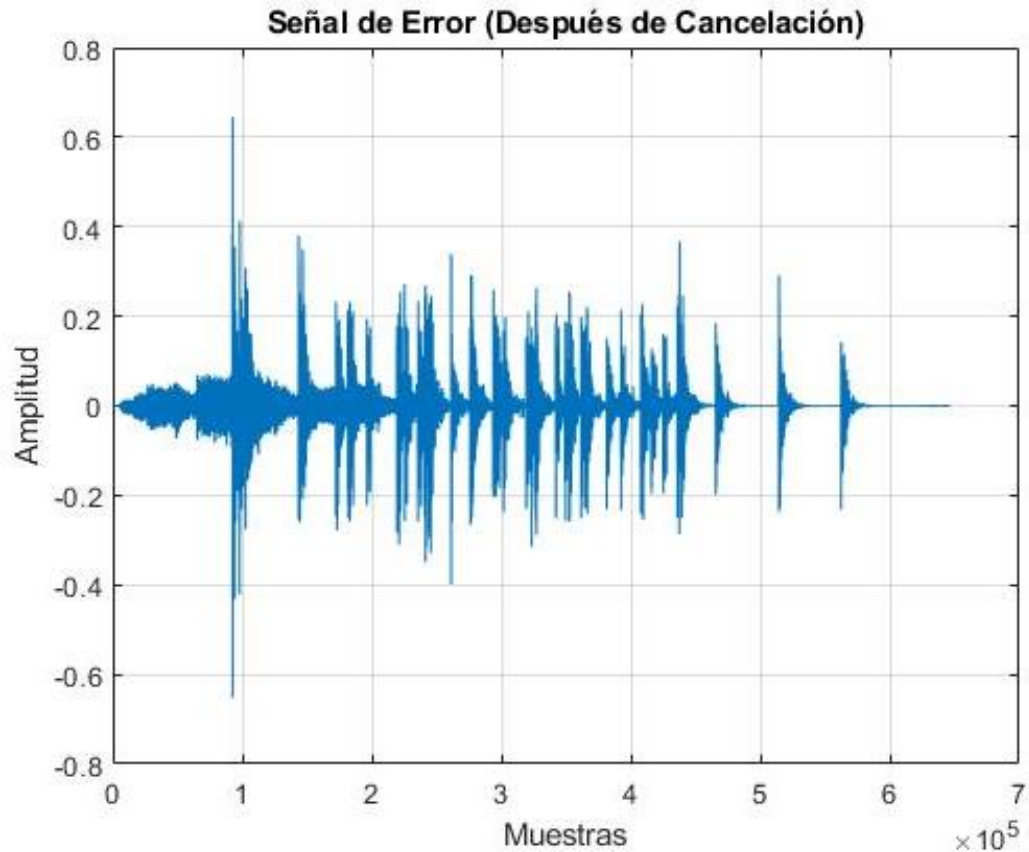


Nota. El gráfico representa el error cuadrático medio que disminuye conforme al número de iteraciones en la señal de ruido de pirotecnia. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 44 se observa una disminución considerable de la señal original de ruido pirotécnico a partir de las primeras explosiones, indicando que el sistema de cancelación activa de ruido responde de manera más eficiente conforme al dominio del tiempo, además se aprecia una disminución progresiva en la señal de error que se percibe en el sistema, alcanzando el pico máximo de 0.65 a 0.3 aproximadamente en las primeras muestras.

Figura 44:

Señal de error de cancelación de ruido pirotécnico en función del tiempo

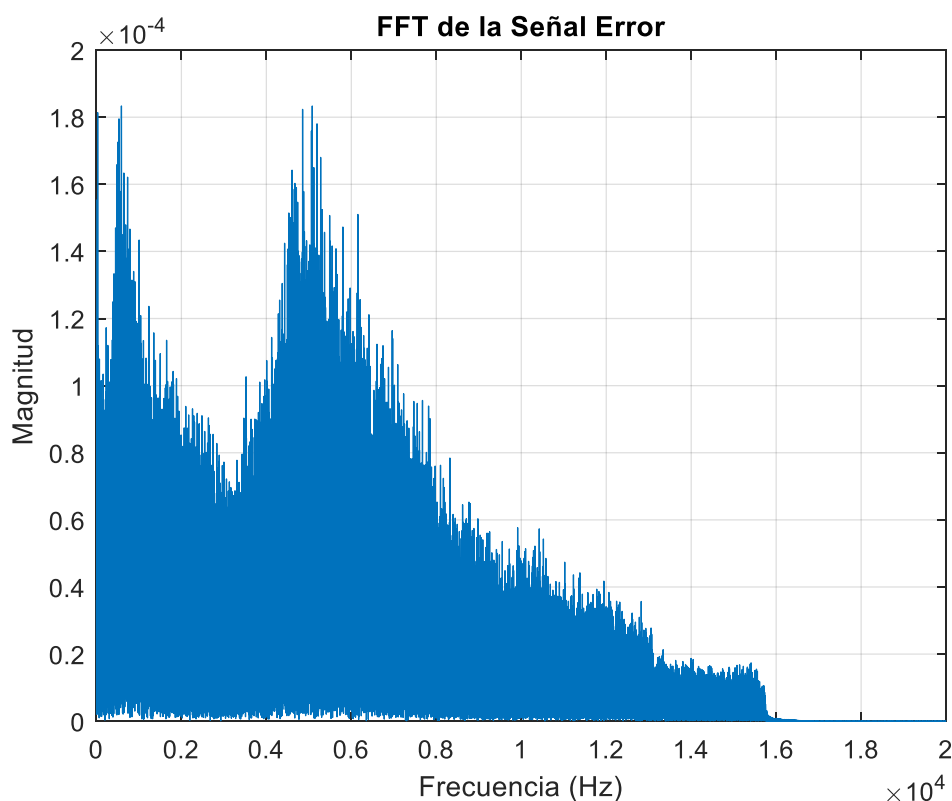


Nota. El gráfico representa la señal de error luego de realizar la cancelación del ruido de pirotecnia en función de las muestras analizadas en el tiempo. Fuente: Elaboración Propia.

Para el análisis frecuencial, se observa en la Figura 45 una atenuación considerable en las frecuencias por debajo de los 4500 Hz. Las frecuencias superiores a este valor se mantienen con menor variación, dentro del ancho de banda de la señal de ruido pirotécnico. Denotando una disminución del valor frecuencial pico de 11×10^{-4} a un valor de 2×10^{-4} representando una cancelación efectiva en la respuesta frecuencial del ruido pirotécnico en 187 Hz, resultando el sistema efectivo para valores frecuenciales estocásticos menores a 500 Hz validando su comportamiento según la definición de efectividad de cancelación de ruido activa para el sistema modelado y diseñado.

Figura 45

Señal de error de cancelación de ruido pirotécnico en función de la frecuencia



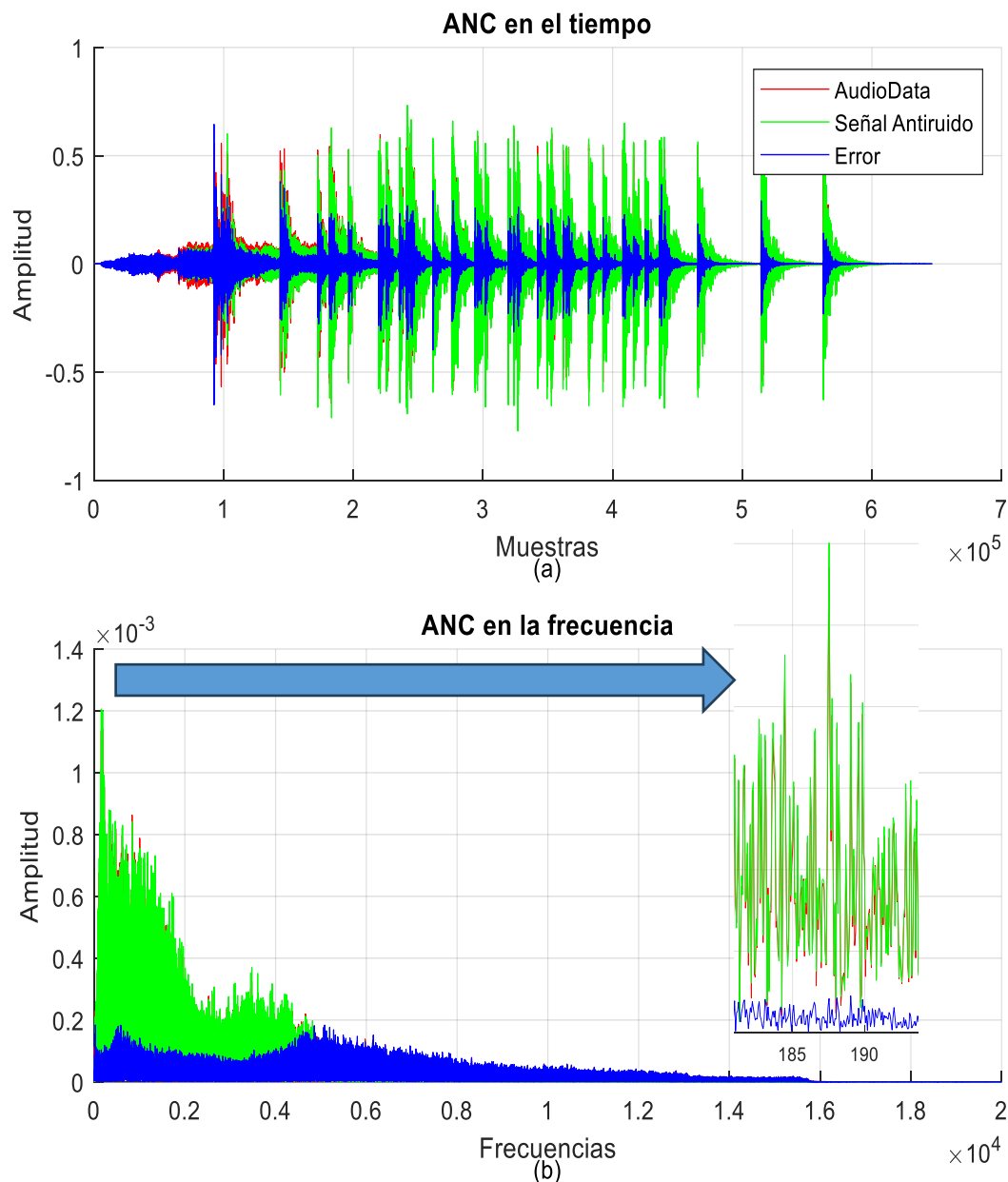
Nota. El gráfico representa la señal de error luego de realizar la cancelación del ruido de pirotecnia en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 46 correspondiente al análisis de ruido de pirotecnia, se observa una clara atenuación en zonas de baja frecuencia que varían con el tiempo, adaptándose continuamente a las variaciones irregulares y caóticas de la señal. Se destaca la reducción de amplitud máxima en la frecuencia de 187 Hz que fue atenuada considerablemente, evidenciando que, cuando el ruido no mantiene una periodicidad o posee una gran carga de energía en frecuencias graves es posible cancelar en gran medida este tipo de ruidos de banda ancha no periódicos.

Además, es posible extrapolar este resultado para otros tipos de sistemas de cancelación de ruido que se enfoquen en ruidos pirotécnicos con una respuesta rápida para el sistema.

Figura 46

Cancelación en tiempo (a) y frecuencia (b) de señal de ruido de pirotecnia



Nota. En la gráfica se observa el resultado de la cancelación activa FxLMS en auriculares para la señal de ruido de pirotecnia en tiempo y frecuencia. Fuente: Elaboración Propia

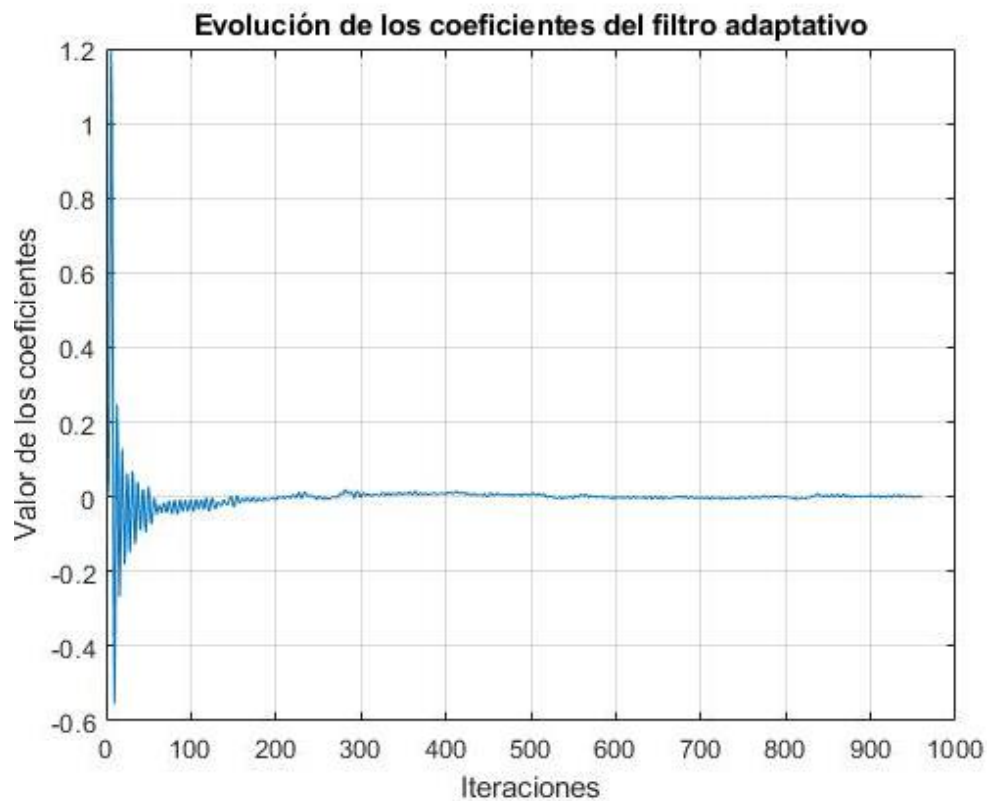
b) Ruido de licuadora

En la Figura 47 se muestra la evolución en el tiempo de los coeficientes del filtro adaptativo para el ruido que produce una licuadora. Se observa que el algoritmo adaptativo alcanza una rápida estabilización en aproximadamente las primeras 100

iteraciones, lo que evidencia una convergencia rápida del filtro adaptativo ante esta señal de ruido continuo y de característica periódica.

Figura 47

Evolución de coeficientes de filtro adaptativo de ruido licuadora.

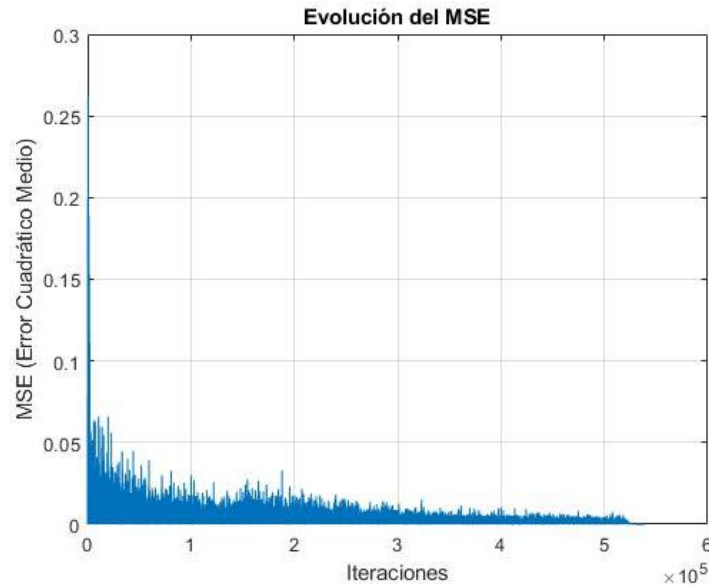


Nota. La gráfica representa como los coeficientes del filtro adaptativo para el ruido de licuadora reaccionan rápidamente ante las primeras iteraciones Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 48 se observa la evolución del error cuadrático medio a lo largo de las iteraciones para el ruido de licuadora. El sistema logra alcanzar un MSE de 0.001219, lo cual significa que el sistema de cancelación de ruido está adaptando y atenuando de manera efectiva. Esto denota una convergencia más lenta que el ruido pirotécnico debido a la ausencia de picos abruptos que altera la señal de error inicial; sin embargo, la disminución del MSE a medida que la señal es procesada por el sistema demuestra una adaptación adecuada del filtro frente a este ruido continuo y periódico.

Figura 48

Evolución MSE del ruido de licuadora.

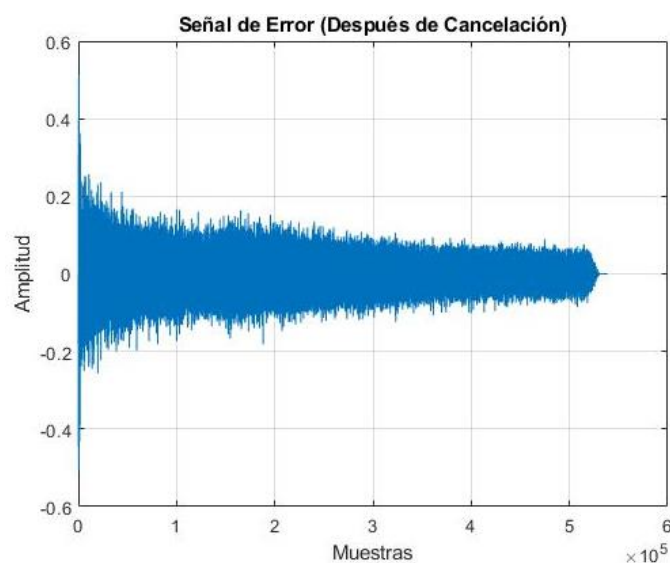


Nota. El gráfico representa el error cuadrático medio que disminuye conforme al número de iteraciones en la señal de ruido de licuadora. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 49, la señal de ruido de licuadora presenta una reducción significativa de ruido a partir de las primeras 2000 muestras en el proceso de cancelación. Además, se observa la señal de error atenuada a un valor de 0.2 de amplitud en el tiempo.

Figura 49

Señal de error de cancelación de ruido de licuadora en el tiempo

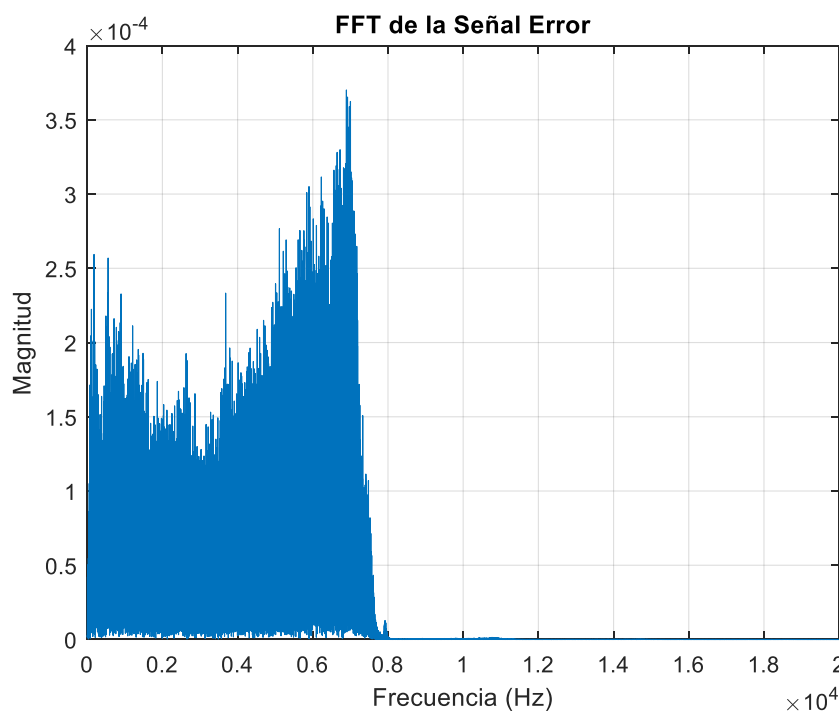


Nota. El gráfico representa la señal de error luego de realizar la cancelación del ruido de licuadora en función del tiempo. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 50 se observa una atenuación significativa en frecuencias menores a 4000 Hz, rango en el que se concentra la mayor parte de ruido generado por los motores de electrodomésticos como la licuadora. Resultando una disminución en la frecuencia pico de 1248 Hz de 56×10^{-4} a 2.5×10^{-4} en la frecuencia con mayor amplitud.

Figura 50

Señal de error de cancelación de ruido de licuadora en función de la frecuencia.

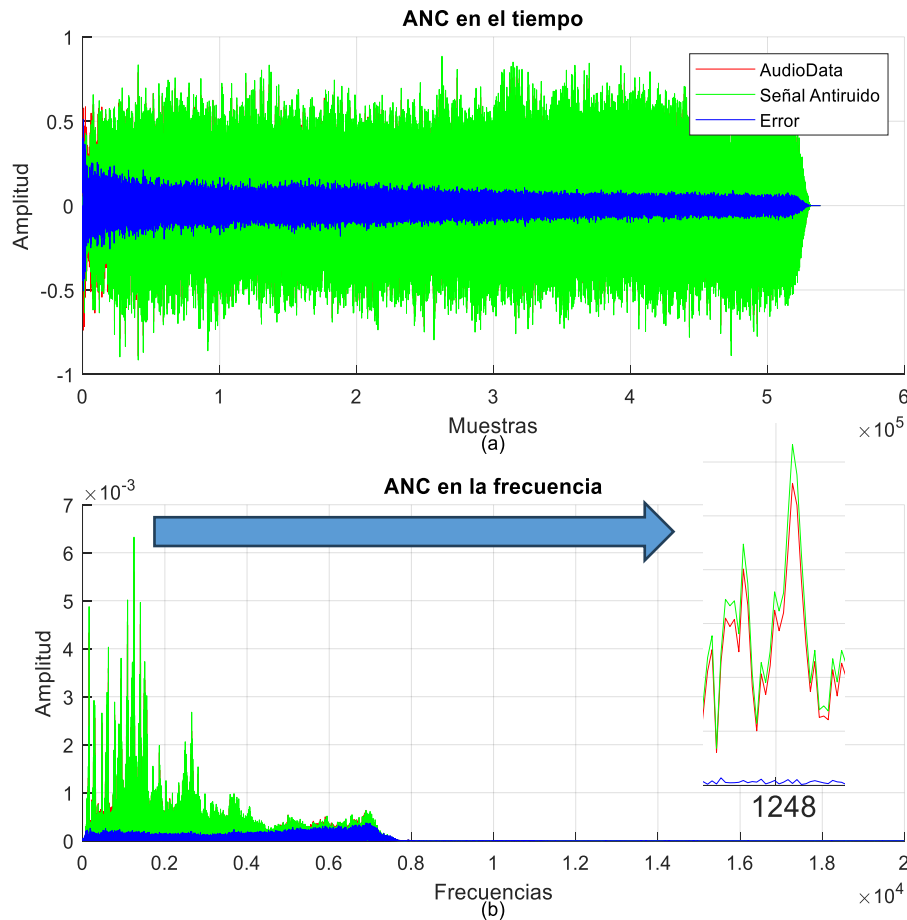


Nota. El gráfico representa la señal de error luego de realizar la cancelación del ruido de licuadora en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia

Para el ruido generado por la licuadora, se observa una atenuación significativa en zonas frecuenciales graves y medias. En particular, el pico de amplitud máxima de 1248 Hz se atenúa de forma considerable, como se muestra en la Figura 51. Además, se observa una notable capacidad de adaptación del sistema en función del tiempo, logrando una reducción de amplitud aún mayor que la del ruido pirotécnico. Si bien, la adaptación del algoritmo es más lenta en comparación con la del ruido estocástico, el sistema consigue una mayor atenuación en el ruido proveniente de motores electrodomésticos como el de la licuadora, que suelen concentrar su energía en bandas limitadas de frecuencia similares.

Figura 51

Cancelación en tiempo (a) y frecuencia (b) de señal de ruido de licuadora



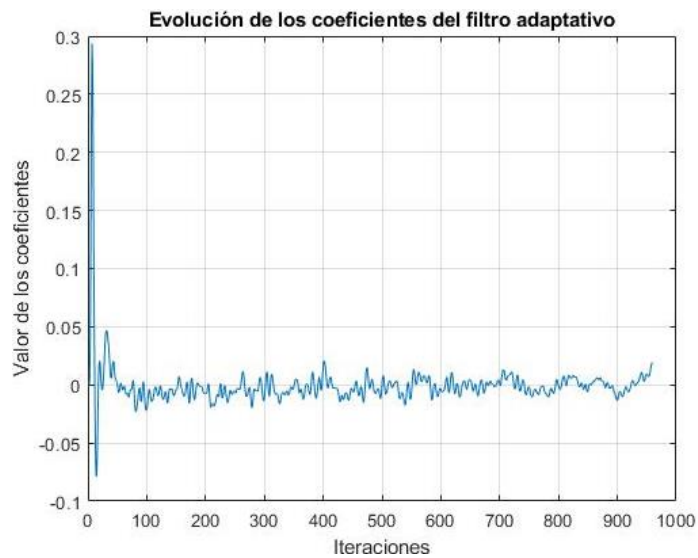
Nota. En la gráfica se observa el resultado de la cancelación activa FxLMS en auriculares para la señal de ruido de licuadora en tiempo y frecuencia. Fuente: Elaboración Propia

c) Ruido de golpe de puertas

Para la señal de ruido producida por el golpe de puertas, la Figura 52 muestra la evolución de los coeficientes del filtro adaptativo en el tiempo. Estos logran una estabilización parcial en las primeras 100 iteraciones, mostrando una respuesta rápida del sistema. Sin embargo, debido a la naturaleza impulsiva de este tipo de ruido, los coeficientes no alcanzan una estabilización total, ya que el sistema de cancelación de ruido al no ser un ruido constante no logra adaptarse demasiado rápido a la señal entrante.

Figura 52

Evolución de coeficientes del filtro adaptativo de ruido golpe de puerta.

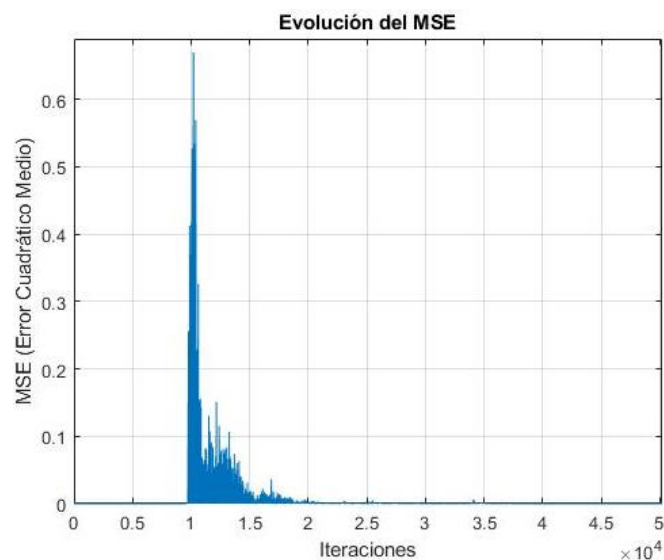


Nota. La gráfica representa como los coeficientes del filtro adaptativo para el ruido golpe de puerta ante las primeras 100 iteraciones. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 53 se observa el MSE que disminuye velozmente a lo largo de las iteraciones observadas. El sistema logra alcanzar un MSE de 0.000585, denotando una cancelación efectiva ante el ruido generado por el golpe de puerta.

Figura 53

Evolución de MSE para ruido golpe de puerta

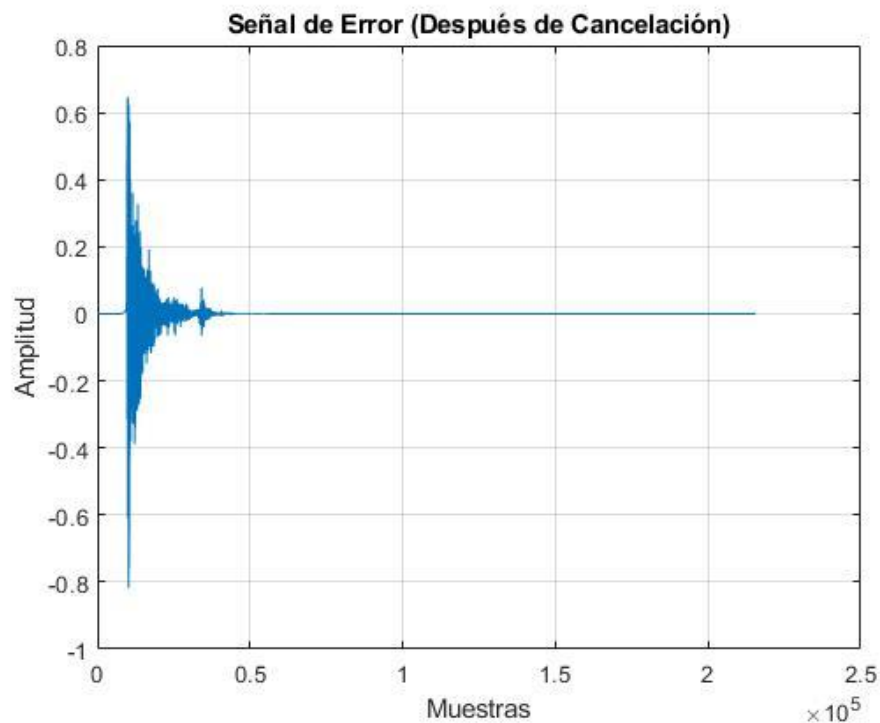


Nota. El gráfico representa el error cuadrático medio que disminuye conforme al número de iteraciones en la señal de ruido golpe de puerta. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 54 se analiza la señal de ruido de golpe de puerta en función del tiempo, observándose una cancelación parcial de la energía concentrada en el instante del impacto. El sistema logra atenuar parcialmente el ruido impulsivo, reduciendo su intensidad durante ese breve periodo, aunque con una eficiencia limitada debido a la naturaleza impulsiva del ruido, además de observarse una disminución en función del tiempo de 1 a 0.3 en la amplitud máxima en función del tiempo.

Figura 54

Señal de error de cancelación de ruido golpe de puerta en función del tiempo.

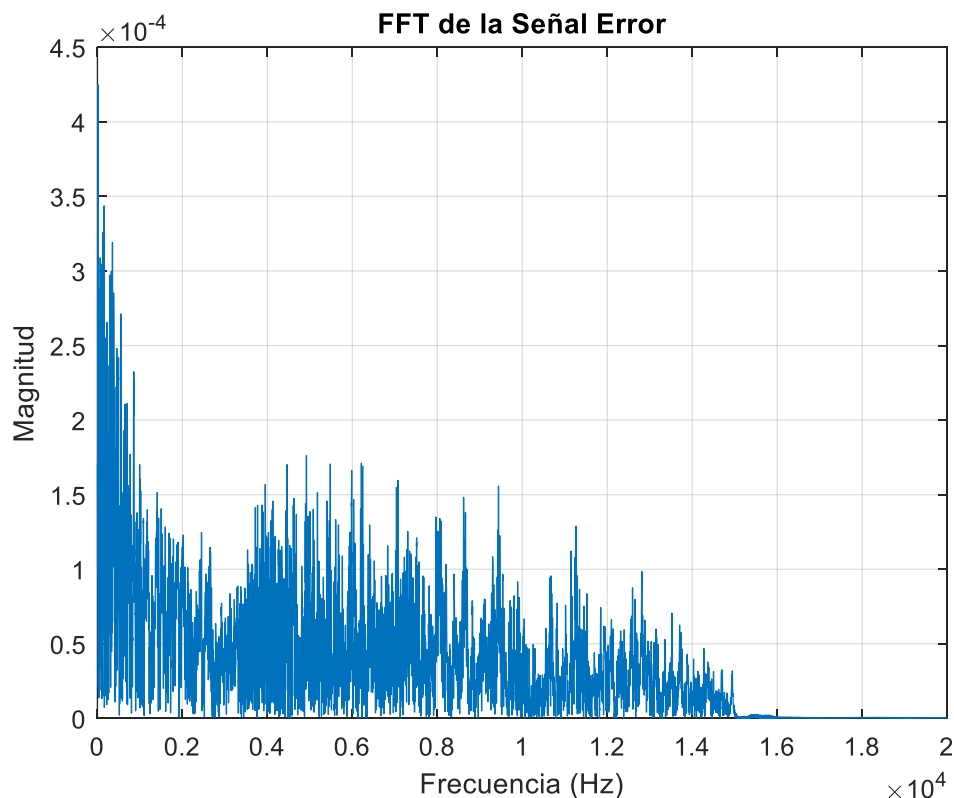


Nota. El gráfico representa la señal de error luego de realizar la cancelación del ruido de golpe de puerta en función de las muestras analizadas en el tiempo. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 55 se presenta el análisis según la frecuencia de la señal de error de cancelación de ruido de golpe de puerta, donde se observa una atenuación considerable en las frecuencias inferiores a 500 Hz. Esta atenuación describe la naturaleza del ruido impulsivo, ya que su contenido espectral se concentra principalmente en frecuencias bajas.

Figura 55

Señal de error de cancelación de ruido de golpe de puerta en función de la frecuencia.



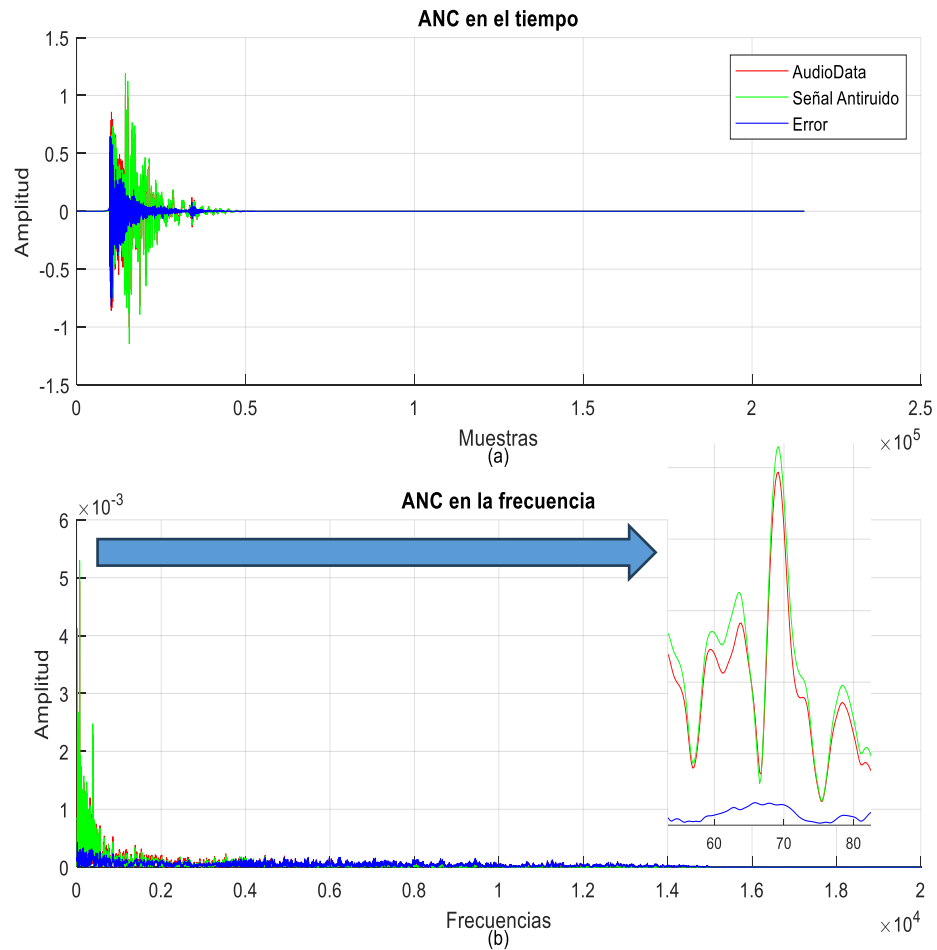
Nota. El gráfico representa la señal de error luego de realizar la cancelación del ruido de golpe de puerta en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia

Para el ruido provocado por el golpe de puerta, se observa en la Figura 56 una disminución significativa en las frecuencias graves. En particular, la amplitud máxima ubicada en los 69 Hz presenta una reducción considerable de amplitud, desde un valor máximo de pico de 49×10^{-4} a un valor de 4×10^{-4} , denotando que el sistema en frecuencias bajas y con una característica impulsiva no periódica es posible reducir el nivel de ruido.

Esta respuesta del sistema demuestra su efectividad frente a ruidos causados por golpes impulsivos de corta duración, pero con alta energía como: golpe de martillos, caída de objetos o cualquier otro sonido que concentre la energía un breve instante de tiempo, además esta cancelación está relacionada con el coeficiente de convergencia dada la estabilidad y velocidad de reacción que posee el sistema diseñado.

Figura 56

Cancelación en tiempo (a) y frecuencia (b) de señal de ruido de golpe de puerta



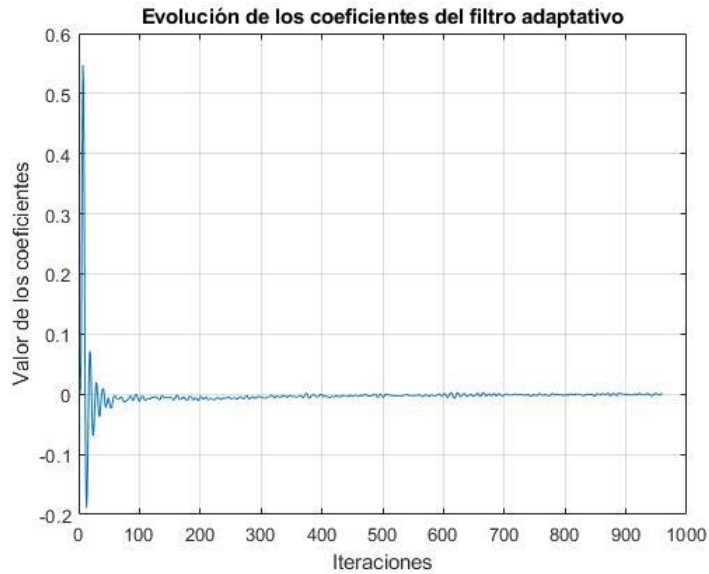
Nota. En la gráfica se observa el resultado de la cancelación activa FxLMS en auriculares para la señal de ruido de golpe de puerta en tiempo y frecuencia. Fuente: Elaboración Propia

d) Ruido de ladridos

Se aprecia en la Figura 57 la evolución de los coeficientes del filtro adaptativo, los cuales logran estabilizarse a partir de las primeras 100 iteraciones. Esto indica una respuesta rápida y efectiva del filtro adaptativo frente al ruido de ladridos, denotando una adaptación eficiente del sistema de cancelación ante este tipo de ruido de banda ancha que posee características similares al ruido de pirotecnia, dado su ancho de banda extenso y picos variables.

Figura 57

Evolución de coeficientes de filtro adaptativo para ruido de ladridos.

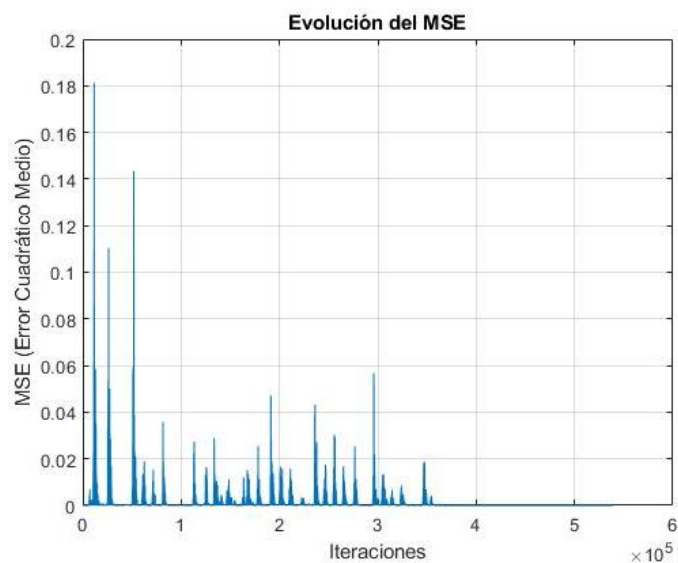


Nota. La gráfica representa como los coeficientes del filtro adaptativo para el ruido pirotécnico reaccionan en las primeras 100 iteraciones. Fuente: Elaboración Propia

Se observa en la Figura 58 la evolución MSE a lo largo de las iteraciones, evidenciando una disminución progresiva de la adaptación y convergencia del algoritmo. El sistema logra alcanzar un MSE de 0.000147, lo que indica una cancelación de ruido efectiva

Figura 58

Evolución del MSE en ruido de ladridos.

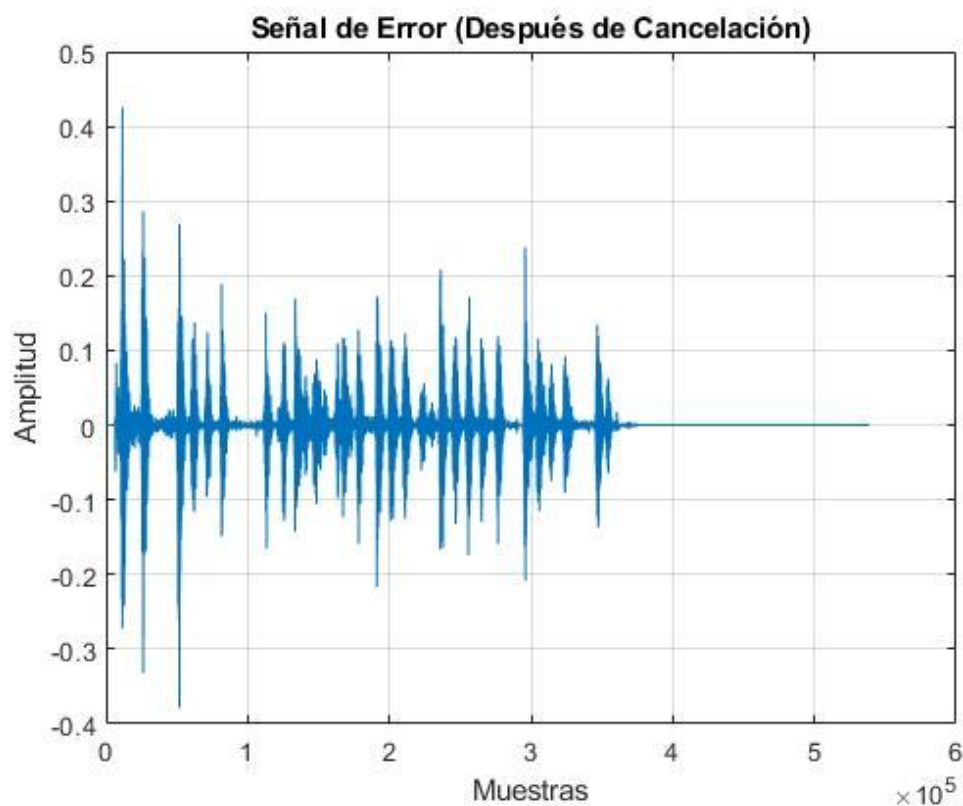


Nota. El gráfico representa el error cuadrático medio que disminuye conforme al número de iteraciones en la señal de ruido de ladridos. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 59 se analiza la señal de error del ruido de ladridos en función del tiempo, donde se evidencia una gran capacidad de atenuación una vez que los coeficientes del filtro adaptativo logran estabilizarse. La señal de error alcanza una reducción máxima aproximada de 0.3 para la señal pico, confirmando la efectividad del sistema de cancelación tras la atenuación de los ladridos.

Figura 59

Señal de error de cancelación de ruido de ladridos en función del tiempo

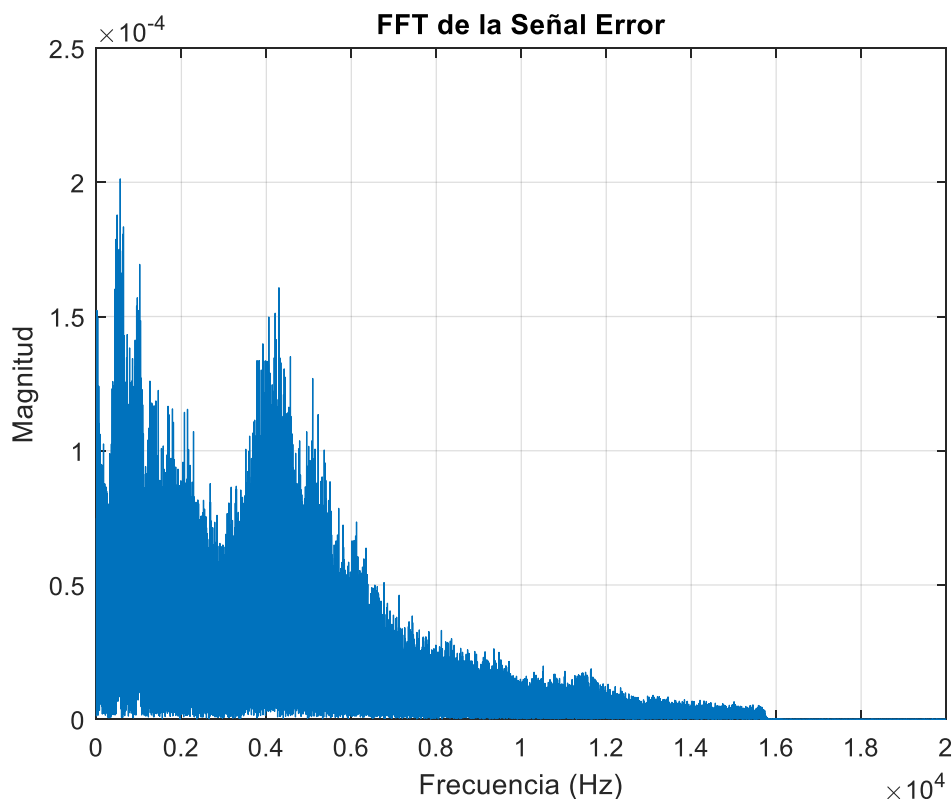


Nota. El gráfico representa la señal de error luego de realizar la cancelación del ruido de ladridos en función de las muestras analizadas en el tiempo. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 60 se analiza la señal de error posterior a la cancelación del ruido de ladridos con respecto a la frecuencia, observándose una atenuación de la señal por debajo de los 2500 Hz. Esta atenuación disminuye notablemente la amplitud del ruido en ese rango de frecuencias por medio de la convergencia y estabilidad del sistema de cancelación de ruido.

Figura 60

Señal de error de cancelación de ruido de ladridos en función de la frecuencia

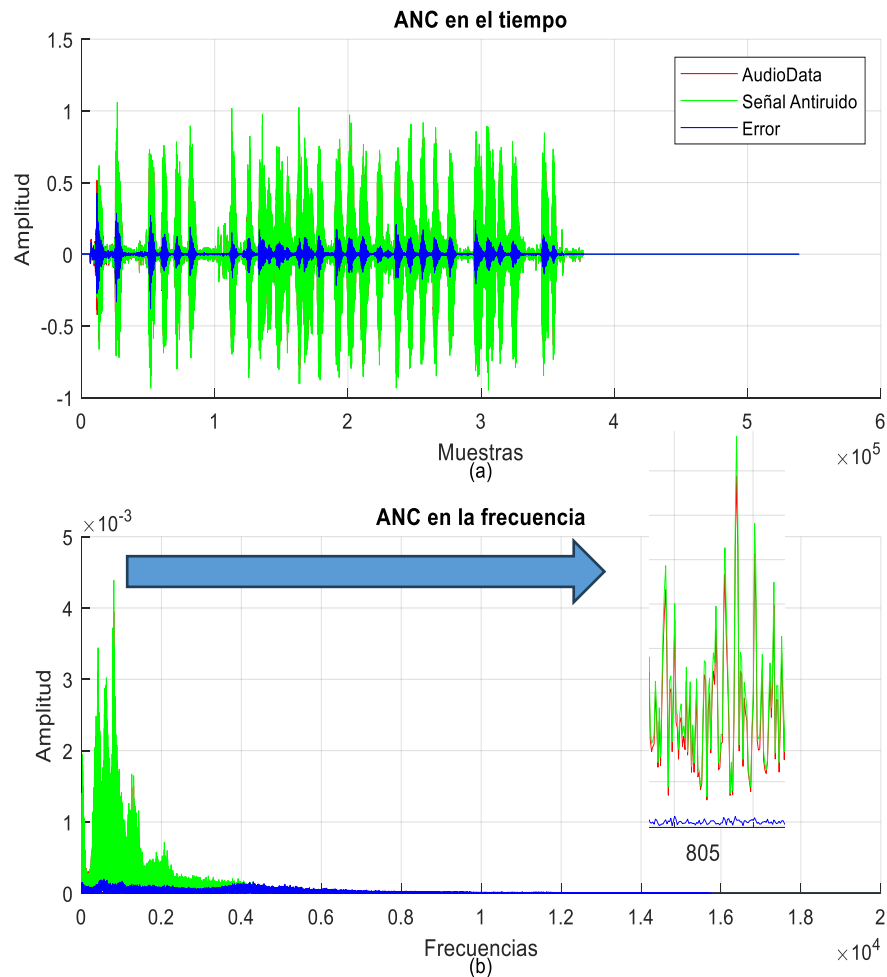


Nota. El gráfico representa la señal de error luego de realizar la cancelación del ruido de ladridos en función de la frecuencia. Fuente: Elaboración Propia

Para el ruido provocado por ladridos, se observa una atenuación considerable en las frecuencias graves de la señal. En particular se evidencia una disminución notable de la amplitud máxima registrada en 808 Hz, que en un principio presentaba un valor de amplitud de 39×10^{-4} , y al ser atenuado por el sistema de cancelación de ruido activo se redujo esta amplitud hasta un valor de 2×10^{-4} mostrada en la Figura 61, lo cual demuestra que el sistema es eficaz para la cancelación activa de este tipo de ruidos de banda ancha y no periódicos como los ladridos, cabe resaltar que la efectividad del sistema no abarca solo frecuencias graves menores a 500 Hz, sino abarca frecuencias medias y graves para las señales no periódicas y estocásticas, resultando una validación de atenuación para el diseño del sistema de cancelación de ruido activa FXLMS para esta clase de ruidos que pueden afectar a las personas que padecen Trastorno del Espectro Autista.

Figura 61

Cancelación en tiempo (a) y frecuencia (b) de señal de ruido de ladridos



Nota. En la gráfica se observa el resultado de la cancelación activa FxLMS en auriculares para la señal de ruido de ladridos en tiempo y frecuencia. Fuente: Elaboración Propia

Estos resultados son especialmente relevantes para validar el funcionamiento del sistema de cancelación de ruido activa FxLMS en auriculares para su aplicación en entornos altamente sensibles como el domicilio de una persona que presenta Trastorno del Espectro Autista, ya que, para ellos, este tipo de ruidos pueden resultar altamente molestos y estresantes para las zonas graves y medias en general.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Se concluye que el proceso de adaptación del sistema de control de ruido doméstico utilizando el algoritmo FxLMS atenúa las señales de ruido de pirotecnia, ruido de licuadora, ruido de golpe de puerta y ruido de ladridos en las frecuencias graves menores a 4000 Hz con resultados favorables para el diseño del sistema planteado

Se verifica que las señales de ruido (pirotécnico, licuadora, golpe de puertas y ladridos) adquiridos por medio del micrófono ECM 8000 y la interfaz de audio Arturia Minifuse 2 permitió la recopilación y evaluación en el software Matlab para su interpretación y determinación del control de ruido tipo Feedforward.

Se concluye que el algoritmo adaptativo que mejor se adapta a los requerimientos del sistema de cancelación activa de ruido es el algoritmo FxLMS, debido a su capacidad de adaptación a diferentes tipos de señales ruidosas. Así mismo, se determinaron los caminos de propagación primaria y la estimación del camino secundario a partir de la base de datos del auricular, los cuales permitieron modelar con precisión el comportamiento del sistema, considerando los efectos de filtrado que sufren las señales de ruido al propagarse en este tipo de entorno.

El diseño del sistema de cancelación de ruido basado en el algoritmo FxLMS permite una cancelación efectiva y variable dependiendo del valor del coeficiente de convergencia μ utilizado, dado que este parámetro presenta un límite crítico para cada tipo de ruido analizado, ya que es posible acelerar el proceso de adaptación. Sin embargo, valores elevados del coeficiente de convergencia pueden comprometer la estabilidad del algoritmo, haciendo que el sistema se vuelva inestable y propenso a fallos en su desempeño.

Con base a los resultados obtenidos, se verifica que el sistema de cancelación de ruido logró atenuar significativamente las frecuencias de mayor amplitud presentes en las señales analizadas. Esta efectividad se debe a que dichos picos se encontraban ubicados en el rango de frecuencias menores a 4000 Hz. Por lo tanto, se concluye que el sistema es particularmente eficiente en la cancelación de ruidos cuya energía se concentra en las bandas de frecuencia graves y medias.

Las personas con Trastorno del Espectro Autista presentan, en muchos casos hiperacusia, lo que los hace especialmente sensibles a ciertos estímulos sonoros. Entre ellos, los cuatro tipos de ruido analizados en esta investigación, ya que pueden generar una alteración sensorial que afecta negativamente su bienestar. En este contexto, el uso del algoritmo FxLMS permite ajustar el coeficiente de convergencia para adaptar la señal de ruido de manera progresiva logrando atenuar eficazmente el ruido con el fin de evitar alteraciones en el sistema nervioso de las personas con TEA.

6.2. Recomendaciones

6.2.1. Futuros Trabajos

El diseño de un sistema de cancelación activa de ruido doméstico orientado a personas con TEA, desarrollado en aplicaciones reales, requiere tener en cuenta diversos factores que puedan influir significativamente en su rendimiento. Entre los aspectos a considerar se encuentran:

- **Ubicación de micrófonos y altavoces:** La ubicación espacial de estos transductores puede provocar filtración de ruido a través del camino secundario o fenómenos de retroalimentación entre los dispositivos, lo cual comprometería la eficiencia del sistema.

- **Potencia de altavoces:** Es fundamental conocer la potencia de salida de los altavoces encargados de emitir una señal antiruido, ya que esta determinará el nivel de atenuación alcanzado por el sistema.
- **Durabilidad del hardware:** La capacidad operativa a largo plazo de micrófonos y altavoces se debe considerar para aplicaciones de uso continuo para garantizar una estabilidad del sistema con el transcurrir del tiempo.
- **Selección del controlador DSP:** El controlador DSP que permita ejecutar los algoritmos adaptativos y procesos de cancelación para garantizar un funcionamiento idóneo debe tener suficiente capacidad de procesamiento para ejecutar los algoritmos adaptativos en tiempo real y manejar las exigencias computacionales del sistema de cancelación de ruido.

Adicionalmente, se recomienda incorporar materiales pasivos absorbentes en las almohadillas de los auriculares. Estos materiales, dependiendo de su composición y grosor, contribuyen a la capacidad de atenuación de frecuencias altas del sistema mayor a los 500 Hz. En combinación con el sistema de cancelación activa de ruido es posible cancelar una mayor cobertura de frecuencias tanto bajas, medias y altas.

6.2.2. Limitaciones

Una de las principales limitaciones para el desarrollo y la reproducibilidad de esta investigación, radica en el proceso de adquisición y filtrado de la base de datos utilizada, correspondiente al auricular in ear Bose QC20. En particular los datos relacionados a los caminos de propagación Primary Path y Secondary Path que fueron obtenidos de este estudio previo, lo que restringe la posibilidad de replicar los resultados sin acceso a dicha información.

Asimismo, el uso de solo los cuatro ruidos (pirotecnia, motor de licuadora, golpe de puerta y ladridos) limita la generalización de los resultados, ya que no garantiza al 100% el resultado obtenido tras la captación de los ruidos exactamente grabados, sin embargo, hay mayor probabilidad de reproducibilidad con los ruidos de golpe de puerta.

y motor de licuadora debido a que en su gran mayoría estos ruidos impulsivos son de baja frecuencia, y el funcionamiento de los motores de electrodomésticos como la licuadora se encuentre alrededor de los 60 Hz. No obstante, para el ruido de pirotecnia y de ladridos de perros pueden llegar a tener picos de intensidad variables en todo el rango frecuencial de 20 a 20 KHz

Finalmente, el uso del algoritmo FxLMS está intrínsecamente vinculado tanto a los cuatro tipos de ruido analizados, así como a la estimación del camino de propagación secundaria. Cualquier variación en las características del entorno acústico o en la modelación del estimado de este camino de propagación puede afectar significativamente el diseño del sistema, representando un factor crítico para su reproducibilidad.

CAPITULO VII: REFERENCIAS

- Arturia. (2021). *Manual de usuario: Minifuse 2* (1st ed.). Arturia SA. https://dl.arturia.net/products/minifuse-2/manual/minifuse-2_Manual_1_0_0_ES.pdf
- Bancayan, C., & Viviana, J. (2020). *La regulación de la pirotecnia y los derechos fundamentales de las personas con trastorno de espectro autista* [Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/55178>
- Behringer. (2013). *Measurement Condenser Microphone ECM8000 Technical Specifications*. https://cdn.mediaVAlet.com/aunsw/musictribe/ri9AgIhkSkeKygnwBCmTbQ/QNqLVKUimkqAlilLXp9r3Q/Original/ECM8000_P0118_S_EN.pdf
- Benois, P. R., Nowak, P., Gerat, E., Salman, M., & Zölzer, U. (2019). Improving the performance of an active noise cancelling headphones prototype. *SEA - ACÚSTICA*. https://www.sea-acustica.es/INTERNOISE_2019/Fchrs/Proceedings/1303.pdf
- Bonnel, A., Mottron, L., Peretz, I., Trudel, M., Gallun, E., & Bonnel, A. M. (2003). Enhanced pitch sensitivity in individuals with autism: A signal detection analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(2), 226–235. <https://doi.org/10.1162/089892903321208169>
- Bregman, A. S. (1990). Auditory Scene Analysis. In *Bioacoustics* (1st ed.). MIT Press. <https://doi.org/10.1080/09524622.2008.9753783>
- Ceron Corza, I. (2023). *Regulación del uso de artefactos de pirotecnia con énfasis en personas de trastorno del espectro autista (TEA)* [Universidad Autónoma del Estado de México]. <https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/139605>
- CONADIS. (2019). *Plan Nacional para las Personas con Trastorno del Espectro Autista* (1st ed.). Ministerio de la Mujer y Poblaciones Vulnerables. https://www.conadisperu.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/PLAN_TEA_2019-2021.pdf
- Corral, Y. (2009). Validez y confiabilidad de los instrumentos de investigación para la recolección de datos. *Revista Ciencias de La Educación*, 19(33). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5362681>
- Danesh, A. A., Howery, S., Aazh, H., Kaf, W., & Eshraghi, A. A. (2021). Hyperacusis in Autism Spectrum Disorders. *Audiology Research*, 11. <https://doi.org/10.3390/audiolres11040049>
- Danesh, A. A., Lang, D., Kaf, W., Andreassen, W. D., Scott, J., & Eshraghi, A. A.

- (2015). Tinnitus and hyperacusis in autism spectrum disorders with emphasis on high functioning individuals diagnosed with Asperger's Syndrome. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2015.07.024>
- Demopoulos, C., & Lewine, J. D. (2015). Audiometric Profiles in Autism Spectrum Disorders: Does Subclinical Hearing Loss Impact Communication? *Autism Research*. <https://doi.org/10.1002/aur.1495>
- Dotch, E., Johnson, J., Black, R. W., & Hayes, G. R. (2023). Understanding Noise Sensitivity through Interactions in Two Online Autism Forums. *ASSETS '23: The 25th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. <https://doi.org/10.1145/3597638.3608413>
- Gazi, O. (2018). Understanding digital signal processing. In *Springer Topics in Signal Processing* (Vol. 13). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4962-0_1
- H. Hansen, C. (2001). *Understanding Active Noise Cancellation*. Spon Press. <https://catalogue.nla.gov.au/catalog/2334098>
- Hansen, C., & Scott Snyder. (2012). Active control of noise and vibration: Overview and current applications. In *The Journal of the Acoustical Society of America* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1121/1.411651>
- Haykin, S. (1995). *Adaptive Filter Theory* (3rd ed.). Pearson Education. https://users.ics.forth.gr/tsakalid/UEVG09/Book/Haykin-AFT%283rd.Ed.%29_Introduction.pdf
- Heller, S. (2003). *Too Loud, Too Bright, Too Fast, Too Tight. What to do if you are sensory defensive in an Overstimulating World* (1st ed.). Harper Collins.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ta ed.). Mc Graw Hill Education. https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- Jones, R. S. P., Quigney, C., & Huws, J. C. (2003). First-hand accounts of sensory perceptual experiences in autism: A qualitative analysis. *Journal of Intellectual and Developmental Disability*, 28(2), 112–121. <https://doi.org/10.1080/1366825031000147058>
- Kahrs, M. (2002). *Applications of digital signal processing to audio and acoustics* (1st ed.). Kluwer Academic. <https://link.springer.com/book/10.1007/b117882>
- Kranowitz, C. S. (2005). *The out of sync child recognizing and coping with sensory processing disorder* (2nd ed.). The Berkley Publishing Group. <https://out-of-sync-child.com/>
- Kuo, S. M., & Morgan, D. R. (1996). *Active Noise Control Systems Algorithms and DSP Implementations* (1st ed.). John Wiley & Sons, Inc. <https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/553072>
- Laita, G. (2012). *Active Noise Control: a case study* [Politecnico Di Milano]. https://www.politesi.polimi.it/retrieve/a81cb05a-6079-616b-e053-1605fe0a889a/2013_04_Laita.pdf

- Lawrence K., W., & Norman C., P. (1979). *Handbook of environmental engineering air and noise pollution control* (1st ed., Vol. 1). The Humana Press. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-6236-7>
- Lengua Arteaga, J. C. (2018). *Active noise control for motors in operating range from 200 to 3000 rpm and noise levels around 90 dBA* [PUCP]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/24833>
- Liebich, S., Fabry, J., Jax, P., & Vary, P. (2019). Acoustic path database for ANC in-ear headphone development. *Proceedings of the International Congress on Acoustics*. <https://doi.org/10.18154/RWTH-CONV-239404>
- MathWorks. (2023). *Matlab Manual básico - R2023b* (1st ed.). MathWorks. www.mathworks.com
- Merino, J. M., & Muñoz-Repiso, L. (2013). La percepción acústica: Física de la audición. *Revista de Ciencias*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/11466>
- Murphy, E., & King, E. (2014). *Environmental Noise Pollution Noise Mapping, Public, Health and Policy* (1st ed.). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/9780124115958/environmental-noise-pollution>
- Narambuena, L., Pardos-Gascón, M., Javaloyes-Sanchís MA, & Palazón-Azorín, I. (2022). Trastorno del espectro autista: observaciones en el patrón evolutivo. Lo que los padres nos cuentan en la consulta. *Pediatra Atención Primaria*. <https://pap.es/articulo/13634/trastornos-del-espectro-autista-observaciones-en-el-patron-evolutivo-lo-que-los-padres-nos-cuentan-en-la-consulta>
- Norton, M. P., & Karczub, D. G. (2007). *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers, 2nd Edition* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.3397/1.2721371>
- OMS. (1999). *Guías para el ruido urbano* (1st ed.). Organización Mundial de la Salud. <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/868/course/section/485/Guias%2520para%2520el%2520ruido%2520urbano.pdf>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2016). *La Contaminación Sonora en Lima y Callao*. <https://repositorio.oefa.gob.pe/handle/20.500.12788/64>
- Ozonoff, S. (2003). *Autism Spectrum Disorders* (1st ed.). American Psychiatric. <https://psycnet.apa.org/record/2003-00554-000>
- PCM. (2003). *Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental para ruido*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/reglamento-estandares-nacionales-calidad-ambiental-ruido>
- Pierce, A. D. (1992). *Physical Acoustics* (1st ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1080/09500349314551251>
- Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (1996). Digital Signal Processing. In *Journal of Vibration and Acoustics* (3rd ed.). Prentice Hall International, Inc. https://uvceee.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/09/digital_signal_processing_principles_algorithms_and_applications_third_edition.pdf

- Qiu, X., Gao, M., & Burnett, I. (2014). A comparison between adaptive ANC algorithms with and without cancellation path modelling. *21st International Congress on Sound and Vibration*. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-comparison-between-adaptive-anc-algorithms-with-Qiu-Gao/55a40899a18713cec0b044b4e1edfbffafc8234d>
- Requena, J. J. (2004). Ruido en el Interior de viviendas. *Sociedad Española de Acústica*. https://documentacion.sea-acustica.es/storage/publicaciones/publicaciones_4350sr160.pdf
- Reshma, B., & Kiran, K. A. (2017). Active Noise Cancellation for In-Ear Headphones Implemented on FPGA. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/ICCONS.2017.8250533>
- Rimland, B., & Edelson, S. M. (1995). Brief report: A pilot study of auditory integration training in autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 25. <https://doi.org/10.1007/BF02178168>
- Rosenhall, U., Nordin, V., Sandström, M., Ahlsén, G., & Gillberg, C. (1999). Autism and hearing loss. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 29(5), 349–357. <https://doi.org/10.1023/A:1023022709710>
- Sahib, M. A., & Kamil, R. (2011). Comparison of Performance and Computational Complexity of Nonlinear Active Noise Control Algorithms. *ISRN Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.5402/2011/925085>
- Salkind, N. J. (2012). *Exploring Research* (8th ed.). Pearson Education, Inc. https://repository.dinus.ac.id/docs/ajar/Neil_J._Salkind_2012_-_Exploring_Research_.pdf
- Sicong, L. (2021). *Research on The Key Technologies in Narrowband Interference and Impulsive Noise Mitigation and Cancellation*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35133-4>
- Snyder, S. D. (2000). *Active noise control primer* (2nd ed.). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-8560-6>
- Soares, J., Cristina, A., Montenegro, A., Dos, W., Souza, S., De, F., Medina, L., Luís Da, O., Fernandes, C., Pereira, G., & Santos, C. (2023). Poluicao sonora em criancas e adolescentes com transtorno do espectro autista. *Scielo Preprints*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.7076>
- Urizar-Sánchez, C., Sario R., H., Walker J., K., & Gomez G., M. (2022). Hiperacusia en trastornos del espectro autista: una revisión de la literatura. *Revista de Otorrinolaringología y Cirugía de Cabeza y Cuello*, 82(2). <https://doi.org/10.4067/s0718-48162022000200258>
- Valentinuzzi, M. E. (2018). Fireworks, Autism, and Animals: What “fun” Noises Do to Sensitive Humans and Our Beloved Pets. *IEEE Pulse*. <https://doi.org/10.1109/MPUL.2018.2856961>
- Zavaleta Quispe, S. N. (2022). *Aislamiento Acústico Pasivo para el Diseño de un Centro de Educación Básica Especial para Personas con TEA en la Provincia de Trujillo* [Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/31450>
- Zeidan, J., Fombonne, E., Scoriah, J., Ibrahim, A., Durkin, M. S., Saxena, S., Yusuf, A., Shih, A., & Elsabbagh, M. (2022). Global prevalence of autism: A systematic

review update. *PubMed*. <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

Zolzer, U. (2008). *Digital Audio Signal Processing* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
<https://fmipa.umri.ac.id/wp-content/uploads/2016/03/Udo-Zolzer-digital-audio-signal-processing.9780470997857.40435.pdf>

CAPITULO IX: ANEXOS

Anexo A: Costos y Presupuesto

PRESUPUESTO		
RUBRO	PARCIAL	TOTAL
A. RECURSOS HUMANOS		3200
Horas Hombre de Trabajo	2500	
Derecho de Sustentación	700	
B. BIENES		3000
Micrófono de Medición	300	
Altavoz de reproducción	500	
Equipo de cómputo/laptop	1500	
Interfaz de Audio	650	
Cable de conexión XLR	50	
Software Matlab (Universidad)	0	
C. SERVICIOS		750
Tiempo y fotocopias	300	
Empastado	150	
Servicio de Internet	300	
PRESUPUESTO TOTAL		6950

Anexo B: Matriz de Consistencia

Diseño de un sistema de cancelación de ruido de fuegos pirotécnicos para personas con Espectro Autista (TEA)						
Planteamiento del Problema	Objetivos de la investigación	Hipótesis de la Investigación	Variables de Estudio	Dimensiones	Indicadores	
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente			
¿Cómo diseñar un sistema de cancelación de ruidos domésticos en auriculares usando el algoritmo FxLMS para personas con Trastorno del Espectro Autista (TEA)?	Diseñar un modelo de sistema de cancelación de ruidos domésticos usando el algoritmo FxLMS para personas con Espectro Autista (TEA) en auriculares.	El algoritmo FxLMS en auriculares reduce cuatro tipos de ruidos domésticos mediante el diseño de un sistema de cancelación activo para personas con Trastorno del Espectro Autista (TEA)	Sistema de cancelación activa de ruidos domésticos en auriculares	1. Diseño del sistema	Programa codificado del algoritmo FLMS	
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas			2. Modelación del Sistema	Respuesta en amplitud y frecuencia de ruido doméstico con mayor concentración de ruido
						Curvas de comportamiento del sistema
				3. Simulación y Validación del Sistema		Modelamiento de caminos de propagación en auriculares
					Simulaciones del comportamiento	
¿Cuáles son las características del ruido doméstico (tiempo y frecuencia) del diseño del sistema de cancelación de ruido?	OE1: Determinar las características del ruido doméstico (tiempo y frecuencia) del diseño del sistema de cancelación de ruido.	El tiempo y la frecuencia de sonido de los cuatro tipos de ruidos (ruido de ladridos, golpe de puerta, pirotecnia y motor de licuadora) es heterogénea, los cuáles influyen en el diseño del sistema de cancelación de ruido.		Variable Dependientes	Validación del sistema con grabaciones reales de 4 ruidos domésticos	
¿Cuál es el modelo del sistema de cancelación de ruido en auriculares en función a la selección y distribución de micrófonos, tipo de ruido y procesamiento del sistema?	OE2: Modelar un sistema de cancelación de ruidos en auriculares en función a la selección y distribución de micrófonos, tipo de ruido y procesamiento del sistema.	El sistema de cancelación Feedforward determina el mayor control de ruido doméstico (ruido de ladridos, golpe de puerta, pirotecnia y motor de licuadora) en auriculares.			Ruido en personas con Trastorno del Espectro Autista	
¿Cómo diseñar y simular el sistema de cancelación de ruido en función del coeficiente de convergencia para los cuatro tipos de ruidos domésticos usando el algoritmo FxLMS para personas con TEA?	OE3: Diseñar y simular el sistema de cancelación de ruidos domésticos en función al coeficiente de convergencia usando el algoritmo FxLMS para personas con TEA.	La estabilidad medida a través del coeficiente de convergencia para los cuatro tipos de ruidos domésticos determina el diseño y la simulación del sistema de cancelación de ruido usando el algoritmo FxLMS.				

Anexo C: Código del sistema de cancelación FxLMS

```

clc
clear all
close all

%%INICIO DE CÓDIGO
sPathCoeffs= load('SecPathBoot_time.txt');
Fs=48000; % Frecuencia de muestreo
N=length(sPathCoeffs);
Nfilt = 12;
Flow = 20;
Fhigh = 20000;
Ast = 20;
delayS = 2;
filtSpecs = fdesign.bandpass('N,Fst1,Fst2,Ast',Nfilt,Flow,Fhigh,Ast,Fs);
bandpassFilter = design(filtSpecs, 'cheby2', 'FilterStructure', 'df2tsos', 'SystemObject',
true);
filteredsecondaryPath = step(bandpassFilter,sPathCoeffs);
t = (1:length(sPathCoeffs)) / Fs;
figure;
subplot(2,1,1);
plot(t,sPathCoeffs);
title('Respuesta al Impulso Original');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Amplitud');
grid on
subplot(2,1,2);
plot(t, filteredsecondaryPath);
title('Respuesta al Impulso Filtrada');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Amplitud');
grid on
secondaryPathCoeffsActual = filteredsecondaryPath;

```

```

t = (1:N)/Fs;
figure, plot(t,secondaryPathCoeffsActual,'b');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Valor Coeficientes');
title('Respuesta al Impulso Secondary Path filtrado');
grid on
ntrS = 180000;
randomSignal = randn(ntrS,1);
secondaryPathGenerator = dsp.FIRFilter('Numerator',secondaryPathCoeffsActual.);
secondaryPathMeasured = secondaryPathGenerator(randomSignal) + ...
    0.01*randn(ntrS,1);
M = 960;% M=Timp*Fs=0.020*48 000 % M=820
muS = 0.5;
secondaryPathEstimator = dsp.LMSFilter('Method','Normalized LMS','StepSize',
muS, ...
'Length', M);
[yS,eS,SecondaryPathCoeffsEst] =
secondaryPathEstimator(randomSignal,secondaryPathMeasured);
n = 1:ntrS;
figure, plot(n,secondaryPathMeasured,n,yS,n,eS);
xlabel('Número de iteraciones');
ylabel('Valores de Señal');
title('Identificación Secondary Path Estimado - Usando el filtro adaptativo NLMS');
legend('Señal Deseada','Señal de Salida','Señal de Error');
grid on
figure, plot(t,secondaryPathCoeffsActual, ...
    t(1:M),SecondaryPathCoeffsEst, ...
    t,[secondaryPathCoeffsActual(1:M)-SecondaryPathCoeffsEst(1:M);
secondaryPathCoeffsActual(M+1:N)]);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Valores del coeficiente');
title('Estimación de la Respuesta al Impulso de Secondary Path');
legend('Real','Estimado','Error');
grid on

```

```

Nfilt = 12; % Orden del filtro (puedes ajustar este valor según tus necesidades)
Flow = 1; % Frecuencia de corte baja en Hz 1Hz
Fhigh = 600; % Frecuencia de corte alta en Hz 6000Hz
filtSpecs = fdesign.bandpass('N,Fst1,Fst2,Ast', Nfilt, Flow, Fhigh, 20, Fs);
bandpassFilter = design(filtSpecs, 'cheby2', 'FilterStructure', 'df2tsos', 'SystemObject',
true);
filteredprimaryPath = step(bandpassFilter,primaryPathCoeffs);
t = (1:length(primaryPathCoeffs)) / Fs;
figure;
subplot(2,1,1);
plot(t,primaryPathCoeffs);
title('Respuesta al Impulso Original');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Amplitud');
grid on
subplot(2,1,2);
plot(t, filteredprimaryPath);
title('Respuesta al Impulso Filtrada');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Amplitud');
grid on
primaryPathCoeffs = filteredprimaryPath.*2000;
figure;
plot(t,primaryPathCoeffs./1000);
title('Respuesta al Impulso Original Primary Path');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Amplitud');
grid on

%% Introducir el ruido a cancelar

%[audioData, Fs] = audioread('sinusoidal_signal2.wav');
%[audioData, Fs] = audioread('puerta.wav');
[audioData, Fs] = audioread('ladridovarios.wav');

```

```

%[audioData, Fs] = audioread('licuadora_sonido.wav');
%[audioData, Fs] = audioread('pirotecnia_sonido.wav');
audioData=audioData(:,1);
M = 960;
mu = 0.007;

%% Inicialización del filtro FxLMS

L = length(audioData);
x_n = zeros(M, 1);
w = zeros(M, 1);
e = zeros(L, 1);
y = zeros(L, 1);

%% Loop de adaptación FxLMS

for n = 1:L

    x_n = [audioData(n); x_n(1:end-1)];
    x_filtered_s = filter(SecondaryPathCoeffsEst, 1, x_n);
    y_n = w' * (x_filtered_s) ;
    y(n) = y_n;
    audioData_filtered_p = filter(primaryPathCoeffs, 1, audioData(n));
    e(n) = audioData_filtered_p - y(n);

    if abs(e(n)) > 1e10
        error('e(n) es muy grande en la iteración %d', n);
    end

    w = w + mu * e(n) * (x_filtered_s);
    if isnan(y_n)
        fprintf('Iteración %d\n', n);
        fprintf('x_n: %f\n', x_n(1:10));
        fprintf('x_filtered: %f\n', x_filtered_s(1:10));
        fprintf('w: %f\n', w(1:10));
    end
end

```

```

        error('y_n contiene NaN en la iteración %d', n);
    end
end

%%% Grafica la señal original

figure;
subplot(3,1,1);
plot(audioData);
title('Señal Original');
xlabel('Muestras');
ylabel('Amplitud');
text(0.5, -0.3, '(a)', 'Units', 'normalized', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10);
grid on

%%% Gráfica de la señal de error

subplot(3,1,2);
plot(e);
title('Señal de Error (Después de Cancelación)');
xlabel('Muestras');
ylabel('Amplitud');
text(0.5, -0.3, '(b)', 'Units', 'normalized', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10);
grid on

%%% Gráfica de la señal antiruido

subplot(3,1,3);
plot(y);
xlabel('Muestras');
ylabel('Amplitud');
title('Señal Antiruido FxLMS');
text(0.5, -0.3, '(c)', 'Units', 'normalized', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10);

```

```

grid on

%% Graficar las tres señales superpuestas

figure;

hold on;
plot(audioData, 'r');
plot(y, 'g');
plot(e, 'b');
hold off;

title('Cancelación Activa FxLMS');
xlabel('Muestras');
ylabel('Amplitud');
legend('AudioData', 'Señal Antiruido', 'Error');
grid on;

audiofft=fft(audioData);
Na=length(audioData);
fv = (0:Na-1)*(Fs/Na);
magnituda = abs(audiofft);
fasea = unwrap(rad2deg(angle(audiofft)));
% Acotar a 20 kHz
limit_freq = 20000;
idx = find(fv <= limit_freq, 1, 'last');

efft=fft(e);
Ne=length(e);
fv = (0:Ne-1)*(Fs/Ne);
magnitudo = abs(efft);
fasee = unwrap(rad2deg(angle(efft)));
% Acotar a 20 kHz
limit_freq = 20000;

```

```

idx = find(fv <= limit_freq, 1, 'last');

yfft=fft(y);
Ny=length(y);
fv = (0:Ny-1)*(Fs/Ny);
magnitudy = abs(yfft);
fasey = unwrap(rad2deg(angle(yfft)));
% Acotar a 20 kHz
limit_freq = 20000;
idx = find(fv <= limit_freq, 1, 'last');

%% GRÁFICO EN FUNCIÓN FRECUENCIA LINEAL
figure;
subplot(311)
plot(fv(1:idx), magnituda(1:idx)/Na);
title('FFT de la Señal de Ruido');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Magnitud');
xlim([0 20000]);
text(0.5, -0.3, '(a)', 'Units', 'normalized', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize',9);
grid on;
subplot(312)
plot(fv(1:idx), magnitud(1:idx)/Ne);
title('FFT de la Señal Error');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Magnitud');
xlim([0 20000]);
text(0.5, -0.3, '(b)', 'Units', 'normalized', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize',9);
grid on;
subplot(313)
plot(fv(1:idx), magnitudy(1:idx)/Ny);
title('FFT de la Señal Antiruido');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Magnitud');

```

```

xlim([0 20000]);
text(0.5, -0.3, '(c)', 'Units', 'normalized', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 9);
grid on;
figure;
hold on; % Mantener el gráfico actual para agregar más curvas
plot(fv(1:idx),magnituda(1:idx)/Na, 'r'); % Línea roja
plot(fv(1:idx),magnitudy(1:idx)/Ny, 'g'); % Línea verde
plot(fv(1:idx),magnitudo(1:idx)/Ne, 'b'); % Línea azul
hold off;
title('Cancelación Activa FxLMS');
xlabel('Frecuencias');
xlim([0 20000]);
ylabel('Amplitud');
legend('AudioData', 'Señal Antiruido', 'Error');
grid on;
mse = zeros(1, L); %
for n = 1:L
    mse(n) = e(n)^2;
end
mse_total = mean(mse);
fprintf('El MSE total es: %f\n', mse_total);
figure;
plot(1:L, mse);
xlabel('Iteraciones');
ylabel('MSE (Error Cuadrático Medio)');
title('Evolución del MSE');
grid on;
figure;
plot(1:M, w); %M es la cantidad de coeficientes
xlabel('Iteraciones');
ylabel('Valor de los coeficientes');
title('Evolución de los coeficientes del filtro adaptativo');
grid on;
%% GRÁFICA COMPARATIVA

```

```

figure;
subplot(211)
hold on; % Mantener el gráfico actual para agregar más curvas
plot(audioData, 'r'); % Línea roja para seno
plot(y, 'g'); % Línea verde para seno duplicado
plot(e, 'b'); % Línea azul para coseno
hold off; % Liberar el gráfico actual

title('ANC en el tiempo');
xlabel('Muestras');
ylabel('Amplitud');
text(0.5, -0.2, '(a)', 'Units', 'normalized', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10);
legend('AudioData', 'Señal Antiruido', 'Error');
grid on;
    subplot (2,1,2);
hold on; % Mantener el gráfico actual para agregar más curvas
plot(fv(1:idx),magnituda(1:idx)/Na, 'r'); % Línea roja
plot(fv(1:idx),magnitudy(1:idx)/Ny, 'g'); % Línea verde
plot(fv(1:idx),magnitudo(1:idx)/Ne, 'b'); % Línea azul

hold off;
    title('ANC en la frecuencia');
xlabel('Frecuencias');
xlim([0 20000]);
ylabel('Amplitud');
text(0.5, -0.2, '(b)', 'Units', 'normalized', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10);
legend('AudioData', 'Señal Antiruido', 'Error'); % Leyenda para identificar las
funciones
grid on; % Activar la cuadrícula
%% FIN DE CÓDIGO

```