



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>





PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE PROTECTORES AUDITIVOS
PARA LA ATENUACIÓN DEL RUIDO GENERADO POR UN
MARTILLO NEUMÁTICO APLICANDO CONTROL ACTIVO
DE RUIDO**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el bachiller:

Daniel La Rosa Macedo

ASESOR: Donato Andrés Flores Espinoza

Lima, septiembre del 2008

ÍNDICE

<u>INTRODUCCIÓN</u>		I
<u>CAPÍTULO 1: EMPLEO DE PROTECCION AUDITIVA EN EL MANEJO DE MARTILLOS NEUMATICOS</u>		
1.1.	Seguridad Auditiva	
1.1.1.	Regulación Internacional	1
1.1.2.	Factores que Rigen la Compra de Protectores Auditivos	2
1.1.3.	Implicancias en la salud	2
1.2.	Protección Auditiva en la Industria	
1.2.1.	Niveles máximos de ruido	3
1.2.2.	Implicancias en el uso de Herramientas Neumáticas	3
1.2.3.	Investigación en Torno al Ruido	4
1.3.	Empleo de Protectores Auditivos	
1.3.1.	El Trabajador frente a su seguridad	4
1.3.2.	Emisiones de baja frecuencia	5
1.3.3.	Regulación Nacional en Seguridad Auditiva	5
1.4.	Factores Implicados en el uso de Protectores Auditivos en el Perú para el manejo del martillo neumático	6
1.5.	Declaración del marco problemático	6
<u>CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE ATENUACION DE RUIDO DE BAJA FRECUENCIA BASADOS EN EL CONTROL ACTIVO DE RUIDO.</u>		
2.1.	Estado del arte	
2.1.1.	Presentación del asunto de estudio	8
2.1.2.	Estado de la investigación	9
2.1.3.	Síntesis sobre el Asunto de Estudio	11
2.2.	Control de Ruido	
2.2.1.	Definición de Ruido	12
2.2.2.	Tipos de Control de Ruido	
2.2.2.1.	Control de Ruido Pasivo	12
2.2.2.2.	Control de Ruido Activo	12
2.2.2.3.	Campo de Aplicación del Control Activo de Ruido	13
2.2.3.	Aspectos Importantes sobre Filtros Digitales	
2.2.3.1.	Clases de Filtros	13
2.2.3.2.	Algoritmos Adaptativos	14
2.2.3.3.	Procesador digital de señales para Implementación de Filtros	15
2.2.4.	Transductores aplicados al Control Activo de Ruido	
2.2.4.1.	Transductores Acústicos	16
2.2.4.2.	Transductores No Acústicos	16
2.2.5.	Martillo Neumático	16
<u>CAPÍTULO 3: DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE RUIDO UTILIZANDO EL ALGORITMO FXLMS</u>		
3.1.	Sistema de Control FeedForward FXLMS	

3.1.1.	Identificación del "Camino Secundario"	17
3.1.2.	Sistema y Algoritmo a Simular	19
3.2.	Características del Ruido Generado por el Martillo Neumático	21
3.3.	Determinación de Parámetros Relevantes para la Simulación	23
3.3.1.	Filtro FIR inicial para filtrado previo de la señal de referencia	23
3.3.2.	Función de transferencia $P(z)$	24
3.3.3.	Función de transferencia del Camino Secundario (\hat{S})	25
3.3.4.	Coefficientes del Filtro Adaptante	26
3.4.	Sistema de Auriculares para Simulación	
3.4.1.	Implementación de Sistema de Auriculares	27
3.5.	Simulación en Matlab-Simulink	28
3.6.	Organización de Pruebas	31
3.7.	Resultados	
3.7.1.	Número de coeficientes y filtro FIR de entrada	32
3.7.2.	Señal de referencia	32
3.7.2.1.	Prueba 1a con filtro inicial FIR	32
3.7.2.2.	Prueba 2a sin filtro inicial FIR	34
3.8	Comentarios	35

CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN Y COSTO

4.1.	Parámetros en la implementación de un sistema de control activo de ruido	36
4.1.1.	Número de multiplicaciones adiciones por segundo (MACS)	37
4.1.2.	Aritmética de punto fijo o punto flotante	38
4.1.3.	Memoria Requerida	39
4.1.4.	Frecuencia de Muestreo	40
4.1.5.	Ciclo de instrucción del procesador	40
4.1.6.	Coste del sistema prototipo	40
4.2.	Selección de arquitectura DSP	41
4.3.	Propuesta de Implementación de Prototipo	42
4.3.1.	DSP TMS320C5510	43
4.3.2.	Códec de Audio Stereo 24Bits	43
4.3.3.	Otros Componentes	
4.3.3.1.	Selección de Cables	44
4.3.3.2.	Selección de Micrófonos	45
4.3.3.3.	Selección de Pre-Amplificadores para micrófono	45
4.3.3.4.	Selección de auriculares	46
4.3.4.	Costo de Prototipo	48
4.4.	Propuesta de Implementación para Producción en Serie	48
4.4.1.	Componentes Implicados en la Implementación	48
4.4.2.	Costo de Implementación en Producción en Serie	49
4.5.	Disposición del sistema implementado	50

<u>CONCLUSIONES</u>	51
----------------------------	----

<u>RECOMENDACIONES</u>	52
-------------------------------	----

<u>FUENTES</u>	53
-----------------------	----

ANEXOS

Anexo N ^o 1 Error con y sin filtro FIR – 512 y 1024 coeficientes	55
Anexo N ^o 2 Error con 512 y 1024 coeficientes	56
Anexo N ^o 3 Error con y sin filtro FIR – 512 y 1024 coeficientes	57
Anexo N ^o 4 Error con 1024 coeficientes reduciendo μ	58
Anexo N ^o 5 Error con y sin filtro FIR – 512 ($\mu = 0.04$) y 1024 ($\mu = 0.01$) coeficientes	59
Anexo N ^o 6 Código TLV320AIC23BDSP Datasheet	60
Anexo N ^o 7 Micrófono Electret 9767 Datasheet	63
Anexo N ^o 8 DSP TMS320C5510 Datasheet	64
Anexo N ^o 9 Amplificador OPA2134 Datasheet	66
Anexo N ^o 10 Altavoz GF0401M Datasheet	67
Anexo N ^o 11 DSP TMS320C5502 Datasheet	68

RESUMEN

Los sistemas de atenuación de ruido cobran importancia ante normas cada vez más exigentes en cuanto al control de ruido se refiere y frente a la progresiva demanda de confort auditivo. Entre las técnicas empleadas para este fin se encuentra el Control Activo de Ruido, desarrollando protectores auditivos como una de sus aplicaciones. La industria de la construcción, es uno de los sectores que emite altos niveles sonoros, siendo una de las causas el uso del martillo neumático, el cual resulta perjudicial para la audición del operario de dicha herramienta. Por ello, debido a que el operario requiere formas para proteger su audición, se hace necesario que cuente con protectores auditivos que de manera eficaz satisfagan esta demanda.

La tecnología en protectores auditivos que se comercializa se basa en técnicas pasivas las cuales no son muy eficientes a bajas y medias frecuencias, debiendo para ese fin aumentar su tamaño causando incomodidad a los operarios. Además, no obstante que en Perú existen normas que regulan los niveles de ruido a partir de los cuales el uso de protección auditiva es necesario, en la práctica se presenta a veces la falta de empleo de dicha protección por parte de los operarios encargados del manejo de la herramienta martillo neumático. Por tanto, la implementación de un sistema de protección auditiva que utilice el control activo de ruido, permitirá la atenuación del ruido en el cual los protectores pasivos pierden efectividad (baja y media frecuencia), mejorando además a largo plazo la salud auditiva y psicológica de los operarios.

La investigación esta desarrollada en cuatro capítulos. En el primer capítulo se analiza la problemática que envuelve el manejo de herramientas de alto nivel sonoro, centrándose en el martillo neumático. El segundo capítulo, presenta el estado actual en lo que respecta a sistemas de control activo de ruido, haciéndose mención del avance de esta tecnología hasta la actualidad y se introducen conceptos básicos para el abordaje del tema, definiéndose el modelo teórico. En el tercer capítulo, muestra todo el procedimiento seguido para la simulación del sistema de control, presentándose las simulaciones realizadas. En el cuarto capítulo se definen los parámetros para la selección del hardware apropiado y se realiza una propuesta de implementación y costos.

Como conclusión principal se obtiene que el sistema de protección auditiva con una señal de referencia no acústica logra atenuar el ruido del martillo neumático desde 3dB hasta un límite de 11.74dB en el 100% de los armónicos entre 100Hz y 630Hz y en más de 2dB en un 86% de los armónicos entre 630Hz y 1000Hz.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, cada vez es más frecuente el uso de sistemas de atenuación de ruido debido a normativas cada vez más rigurosas en lo que respecta a niveles máximos permitidos y/o por la creciente necesidad de confort auditivo. Entre las técnicas empleadas para este fin se encuentra el Control Activo de Ruido, entre cuyas aplicaciones está el desarrollo de protectores auditivos. La industria de la construcción se caracteriza por los altos niveles sonoros que emiten las diversas herramientas usadas para este rubro, en particular el ruido del martillo neumático resulta perjudicial para la audición del operario de dicha herramienta. Por ello, debido a que el operario requiere formas para proteger su audición, es necesario que cuente con protectores auditivos que de manera eficaz satisfagan esta demanda.

Sin embargo, la tecnología en protectores auditivos que se comercializa, se basa en técnicas pasivas, con lo cual, si lo que se desea es atenuar frecuencias bajas y medias, el protector deberá aumentar su tamaño causando incomodidad a los operarios.

Debido a la necesidad de innovar o mejorar los protectores auditivos frente a los tradicionales (pasivos), surge como alternativa el empleo del control activo de ruido (ANC por sus siglas en inglés). La idea del ANC fue desarrollada en 1936 por Lueg,

sin embargo el verdadero interés por el ANC surge a partir de los trabajos de Widrow sobre filtrado adaptativo, además de la salida al mercado de procesadores de señal de una gran velocidad de operación y cuyos costos se han reducido con el paso de los años haciendo viable esta propuesta.

En Perú, no obstante que existen normas que regulan los niveles de ruido límite a partir de las cuales es necesario el uso de equipos de protección auditiva, en la práctica se presenta con frecuencia la falta de empleo de dicha protección por parte de los operarios encargados del manejo de la herramienta martillo neumático. Esto debido a problemas de comodidad, mal estado o falta de conciencia en el cuidado de su salud.

La presente investigación plantea como hipótesis que dada la necesidad de los operarios del martillo neumático de contar con protectores auditivos que brinden una protección eficaz en el rango de frecuencias bajas y medias, sumado a las consecuencias que produce la exposición a ruido intenso en la salud física y psicológica (ver referencias), entonces, la implementación de un sistema de protección auditiva que utilice el control activo de ruido, permitirá la atenuación del ruido en el cual los protectores pasivos pierden efectividad (baja y media frecuencia), mejorando además a largo plazo la salud auditiva y psicológica de los operarios.

El objetivo de esta tesis es realizar el estudio y la simulación del sistema de control activo para protectores auditivos utilizados para atenuar el ruido generado por un martillo neumático, y a su vez presentar una propuesta de implementación y costos. Cabe indicar que esta investigación pretende ser el paso inicial para un proyecto mayor el cual culminaría con la implementación de software y hardware del sistema

propuesto en un producto comercial. Con esta tesis se pretende contribuir a dicho proyecto.

La metodología empleada considera una investigación sobre las técnicas de control activo empleadas en la actualidad, junto con un estudio del ruido generado por el martillo neumático. Así también, se contará con un sistema de auriculares real para la obtención de parámetros necesarios para la simulación.

Dado el creciente interés en sistemas de control activos de ruido, los principales medios de adquisición de información han sido referencias bibliográficas e internet; seleccionándose referencias especializadas en estudio o investigación de dicho tema.

La investigación esta desarrollada en cuatro capítulos. En el primer capítulo se analiza la problemática que envuelve el manejo de herramientas de alto nivel sonoro, centrándose en el martillo neumático. El análisis se divide en tres partes: (i) implicancias de la seguridad auditiva, (ii) protección auditiva en la industria, (iii) empleo de protección auditiva en el ámbito nacional. Luego de lo cual se procede a vislumbrar un marco problemático específico.

El segundo capítulo, presenta el estado actual en lo que respecta a sistemas de control activo de ruido, haciéndose mención del avance de esta tecnología hasta la actualidad. En la indagación del método más apropiado para la aplicación a desarrollar, se introducen conceptos básicos para el abordado del tema. Definiéndose el modelo teórico con ello.

El tercer capítulo, muestra el procedimiento seguido para la simulación del sistema propuesto, comentándose las características del sistema y definiéndose los

parámetros para la simulación. Se presentan además pruebas simuladas en función a variaciones de la señal de entrada, deseada y el número de coeficientes, culminándose con un bloque de comentarios.

En el cuarto capítulo se definen los parámetros para la selección del hardware apropiado en base a los resultados de las simulaciones. Se describe las características del sistema y la arquitectura propuesta para su desarrollo. También se realiza una propuesta de costos de prototipo, así como una propuesta ligera de implementación en serie con fines comparativos.

Como conclusión principal la presente investigación establece que el sistema de protección auditiva con una señal de referencia no acústica lograría atenuar el ruido del martillo neumático desde 3dB hasta un límite de 11.74dB en el 100% de los armónicos entre 100Hz y 630Hz y en más de 2dB en un 86% de los armónicos entre 630Hz y 1000Hz. De igual forma, podemos concluir también que el sistema propuesto actuará en el rango de 100Hz a 1000Hz debiéndose complementar con otros métodos de atenuación.

CAPÍTULO 1

EMPLEO DE PROTECCION AUDITIVA EN EL MANEJO DE MARTILLOS

NEUMÁTICOS

En los últimos años, los sistemas de atenuación de ruido son cada vez más frecuentes por la creciente necesidad de confort auditivo o debido a controles y normativas cada vez más rigurosos; para este fin se emplean métodos de atenuación pasivos o activos. El presente capítulo muestra los diversos factores implicados en la problemática del ruido, sean externos o internos, tales como: regulación internacional y nacional, estudios del ruido y su inferencia en la salud, etc. Se hace un especial enfoque en el ruido causado por factores industriales, básicamente el ruido generado por un martillo neumático y se concluye con la problemática de los obreros que emplean dicha herramienta resumida en una declaración de marco problemático.

1.1. Seguridad Auditiva

1.1.1. Regulación Internacional

En lo concerniente a estándares internacionales se consideraron los siguientes de mayor relevancia:

- ISO 1996: Acústica - Descripción y medida del ruido ambiental.
- ISO 1999: Acústica - Determinación de la exposición a ruido laboral y estimación de la pérdida auditiva inducida por ruido.

- ISO 8297: Acústica - Determinación de los niveles de potencia sonora de plantas industriales multifuente para la evaluación de niveles de presión sonora en el medio ambiente - Método de ingeniería.
- ISO 11201-11204: Ruido emitido por máquinas y equipos - Medida (y determinación) de los niveles de potencia sonora en el trabajo.

Organización Internacional del trabajo (Normas Internacionales del Trabajo) Convenio Núm. 148: *“Si los empleadores no logran reducir la contaminación del aire, el ruido o las vibraciones con las medidas técnicas y de organización del trabajo, deberán suministrar al trabajador un equipo de protección individual apropiado.”*

1.1.2. Factores que Rigen la Compra de Protectores Auditivos

La industria de protectores auditivos se encuentra en un estado de madurez en la fabricación de protectores pasivos (tipo auricular o tapón), presentado una gama amplia productos. La elección de compra de protectores auditivos se rige principalmente por los siguientes puntos:

- Nivel de atenuación deseado
- Rango de frecuencias a atenuar
- Comodidad
- Factibilidad de uso en conjunto con otros equipos de protección

1.1.3. Implicancias en la salud

Según la Organización mundial de la salud el ruido elevado causa: [16]

- Problemas en la comprensión del habla.
- Deterioro permanente de la audición. (ISO 1999 proporciona un método de estimación del deterioro y fija límites máximos de ruido).
- Trastornos del sueño.
- Dificultad al leer, pérdida de concentración y rendimiento.

- Malestar (intranquilidad, inquietud, desasosiego, depresión, desamparo, ansiedad o rabia)

Así también stress y efectos relacionados con ello, tal como: cansancio crónico, tendencia al insomnio, enfermedades cardiovasculares (hipertensión, cambios en la composición química de la sangre, isquemias cardiacas, etc.). [14]

1.2. Protección Auditiva en la Industria

1.2.1. Niveles máximos de ruido

El nivel de ruido máximo continuo permitido, varía de acuerdo a la norma de cada país; variando entre 75dB - 90dB por jornada laboral (8 horas). Por tanto, toda persona expuesta a ruido a partir de dicha intensidad debe contar con protección auditiva.

El cuadro 1.1 presenta el tiempo máximo de exposición frente a algunos niveles de sonido:

No. de horas de exposición	Nivel del sonido en dB
8	90
4	95
2	100
1	105
½	110
¼ o menos	115

Tabla 1.1 Tiempo máximo de exposición según intensidad de ruido

1.2.2. Implicancias en el uso de Herramientas Neumáticas

Entre las *herramientas neumáticas* se tienen cinceladoras, taladros, martillos y lijadoras. Algunas de ellas disparan elementos de fijación a gran velocidad y presión contra superficies. Por lo general, el empleo de estas herramientas debe ser acompañado de elementos de seguridad.

Se tendrá como uso obligatorio protección de ojos, cara y auditiva, así también como calzado especial. El uso de estas herramientas conlleva también a exponerse ante vibraciones, sobreesfuerzos y torceduras.

1.2.3. Investigación en Torno al Ruido

Las investigaciones realizadas se basan en la toma de datos que se obtienen de situaciones no forzadas de exposición al ruido. Esto pues, es éticamente imposible experimentar intencionalmente con la audición humana, por lo tanto no sería viable inducir pérdidas auditivas mediante la exposición de un individuo a ruidos controlados. Se tiene entonces que los diversos estudios tanto de condiciones laborales como ambientales se obtuvieron mediante muestras diversas tomadas de la realidad cotidiana las cuales fueron analizadas estadísticamente. Resultando de ello las normas y reglamentos dados internacional como nacionalmente. De esto se puede señalar que si bien estos estudios reflejan a la población en conjunto, los efectos a diversas intensidades de ruido pueden variar dependiendo del individuo expuesto.

1.3. Empleo de Protectores Auditivos

1.3.1. El Trabajador frente a su seguridad

Los siguientes puntos extraídos de la *Norma Internacional del Trabajo* desarrollada por la *Organización Internacional de Trabajo* muestran algunos datos resaltantes los cuales vinculan a trabajador con su seguridad:

- Los trabajadores y/o sus representantes deberán recibir una información suficiente y una formación apropiada, y deberán ser consultados por el empleador. Además, deberán colaborar con este último.
- El trabajador deberá indicar inmediatamente a su superior jerárquico directo cualquier situación de la que tenga un motivo razonable para creer que entraña un peligro inminente y grave para su vida o su salud.
- Hasta que el empleador haya adoptado medidas correctivas, no podrá solicitar a los trabajadores que reanuden el trabajo en una situación en la que persista tal peligro.

- Un trabajador que se haya retirado de tal situación laboral, deberá ser protegido contra consecuencias injustificadas.
- Las medidas de seguridad e higiene del trabajo no deberán implicar ninguna carga financiera para los trabajadores.

1.3.2. Emisiones de baja frecuencia

Si bien las emisiones sonoras más perjudiciales a la salud son aquellas que se caracterizan por contener una potencia elevada en el rango alto de frecuencias, debido a que la estructura aparato auditivo presenta una mayor defensa ante las frecuencias bajas. Esto no evita que a niveles elevados de ruido de baja frecuencia también se causen molestias o daños del sistema auditivo, equipos como motores, compresoras, etc. son ejemplos representativos de fuentes emisoras de ruido de baja frecuencia. Se considerará por lo tanto baja frecuencia toda emisión sonora por debajo de los 500Hz.

1.3.3. Regulación Nacional en Seguridad Auditiva

Se han considerado las siguientes normas nacionales y algunas afines al sector construcción:

- Constitución Política del Perú (Inc. 22º. del Art. 2º y Art. 67.)
- Ley N° 28611, “Ley General del Ambiente”
- Decreto Supremo N° 044-98-PCM, “Reglamento Nacional para la Aprobación de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental y Límites Máximos Permisibles”
- Decreto Supremo N° 009-2005-TR, “Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo”

1.4.

Factores Implicados en el uso de Protectores Auditivos en el Perú para el manejo del martillo neumático

En lo referente a la utilización de protectores auditivos en el manejo de la herramienta denominada martillo neumático, se observó lo siguiente:

- Los operarios prescinden de protección auditiva, debido a incomodidad o porque no les son proporcionados.
- El uso de protectores auditivos voluminosos agregan cierto peso, presión e incomodidad al operario.
- Deterioro físico y psicológico de los operarios a largo o mediano plazo.
- El ruido de baja frecuencia, como el motor del martillo neumático, no se atenúa eficazmente mediante el uso de protección pasiva.

1.5. Declaración del marco problemático

No obstante que existen normas que regulan los niveles de ruido límite a partir de las cuales es necesario el uso de equipos de protección auditiva, en la práctica se presenta con frecuencia la falta de empleo de dicha protección por parte de los operarios encargados del manejo de la herramienta martillo neumático; esto debido a problemas de comodidad, mal estado o falta de conciencia en el cuidado de su salud. Se tiene además que la protección convencional no es muy efectiva al atenuar el ruido de baja frecuencia producido por dicha herramienta. La protección auditiva convencional es la que utiliza métodos pasivos, con lo cual, si lo que se desea es atenuar frecuencias bajas y medias, el protector deberá aumentar su tamaño.

Por este motivo el protector podría llegar a causar molestias a los operarios y el consiguiente desuso, generando esto último problemas como pérdida de la audición y discapacidad profesional, así también problemas de índole psicológico como falta de concentración, stress, etc.; todo ello generado por el ruido excesivo producido por el martillo neumático.

Lo óptimo será por lo tanto, contar con protectores los cuales proporcionen al operario protección adecuada a bajas frecuencias y que presenten la mayor comodidad posible.



CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE ATENUACION DE RUIDO DE BAJA FRECUENCIA BASADOS EN EL CONTROL ACTIVO DE RUIDO

El capítulo 2, presenta el estado del arte en lo que respecta a sistemas de control activo de ruido, haciéndose mención de avance de esta tecnología hasta la actualidad.

Introduciéndose además los agentes implicados en el control activo de ruido, llámense: tipos de control activo, filtros adaptativos, filtros digitales y tecnología empleada en el control activo.

2.1. Estado del arte

2.1.1 Presentación del asunto de estudio

El requerimiento cada vez mayor en calidad y fidelidad de sonido en equipos de audio y comunicaciones portátiles, a su vez la necesidad de protección auditiva para seguridad y/o confort frente a ruidos acústicos ocasionados en ámbitos como la industria y/o el ruido comunitario hacen del Control Activo de Ruido una solución relevante. Esto pues, sistemas tradicionales llamados “pasivos” no son eficientes frente a ruidos de bajas frecuencias resultando los sistemas activos mucho mejores debido al menor costo, simplicidad y nivel de atenuación favorable a frecuencia bajas. Para esto, dado que los parámetros sonoros y ambientales varían en el tiempo, se emplean filtros adaptativos lográndose así un correcto seguimiento de la señal de ruido.

Su efectividad queda en evidencia ante la comercialización en los últimos años de protectores auditivos, autos y equipos en general los cuales presentan soluciones al ruido basadas en esta alternativa.

2.1.2 Estado de la investigación

Uno de los problemas cada vez más evidentes en la industria, es el incremento del ruido acústico causado por el aumento del uso de equipos industriales como cinceladoras, martillos neumáticos, compresores, motores, etc. los cuales están en uso en aviones, carros e instalaciones al aire libre [1].

Así también, el desarrollo acelerado de equipos de audio portátiles y dispositivos de comunicación, como reproductores de MP3, teléfonos celulares, PDAs, y auriculares de comunicación inalámbrica, delega en los diseñadores la necesidad de analizar el uso de estos dispositivos en ambientes ruidosos. [3]

Existen métodos de control de ruido los cuales usan técnicas pasivas, pero estos resultan costosos, relativamente grandes e ineficaces a bajas frecuencias. Debido a esto surge como alternativa el Control Activo de Ruido (ANC por sus siglas en inglés) el cual se basa en el principio de superposición.

Específicamente, un antirruído de igual amplitud y opuesto en fase es generado y se combina con el ruido primario, dando como resultado la cancelación de ambos. El aporte de estos sistemas se encuentra en su reducido tamaño, peso, volumen y costo, dando a su vez una reducción considerable de ruido; reducción que no será total pero sí significativa debido a diferencias entre las fuentes primaria y secundaria. [5]

La idea del ANC fue desarrollada en 1936 por Lueg, sin embargo el verdadero interés por el ANC surge a partir de los trabajos de Widrow sobre filtrado adaptativo,

además de la salida al mercado de equipos DSPs para procesamiento de señales, los cuales presentan una gran velocidad de operación y cuyos costos se han reducido con el paso de los años. [1]

Se presentan los siguientes sistemas de control activo de ruido:

1. Control Feedforward, desarrollado por Lueg. Presenta dos categorías: Broadband feedforward y Narrowband feedforward. [1]
2. Control Feedback, desarrollado por Olson and May. [1] y [4]
3. Control Multiple-Chanel.

Dado que las características de la fuente de ruido acústico y el ambiente varían en el tiempo; el contenido en frecuencia, amplitud, fase, y velocidad del sonido no deseado son no estacionarios; por tanto se tendrá que un sistema ANC debe ser adaptable para cumplir con estas variaciones, para ello se emplean filtros adaptativos que ajustan sus coeficientes para minimizar la respuesta de error. Los algoritmos más usados en los filtros de control activo de ruido son:

- LMS Least mean square, el cual presenta mejoras como:

The Filtered-X LMS, Filtered-U RLMS y Filtered-X LMS Algorithm With Feedback Cancellation.

- RLS Técnica de mínimos cuadrados recursivos
- Kalman

De estos, se obtiene la siguiente relación en cuanto a la eficacia de la respuesta obtenida:

Kalman > RLS > LMS

Sin embargo debido a que para la aplicación específica del ANC la mejora no resulta significativa y además teniendo en cuenta parámetros como simplicidad y bajo coste operacional, el algoritmo LMS resulta siendo el más empleado.

Así mismo, estos algoritmos adaptativos se pueden realizar en filtros como:

- Transversal (FIR) finite impulse response
- Recursivo (IIR) infinite impulse response

- Filtros lattice
- Filtros en el dominio de la transformada

Siendo de estos, el tipo FIR usado con mayor frecuencia debido a su estabilidad.

Comercialmente este sistema se va introduciendo cada vez más en automóviles, marcas como Honda, Acura LR y Mercedes-Benz lo han empleado para reducir el ruido ocasionado por el motor, viento, etc.

Fabricantes de protectores auditivos como Sennheiser, Sony y Shure también emplean este sistema combinado con técnicas pasivas. En particular, la empresa Sennheiser se especializa en protectores auditivos aplicados a la reducción del ruido generado por turbinas de avión, dicha empresa entrelaza el control activo con el pasivo y ello lo suma a un sistema de comunicaciones, presentando una línea de protectores auditivos especiales para pilotos.

Los precios varían desde por debajo de 50 dólares hasta superiores a 200 dólares.

2.1.3 Síntesis sobre el Asunto de Estudio

El bajo costo, simplicidad, tamaño reducido y buenos resultados a frecuencias bajas hacen del ANC la solución principal para problemas de ruido. Sin embargo se debe tener en cuenta que al presentar carencias a frecuencias altas (mayores a 500Hz), no es posible tomarlo como una solución completa, por lo cual los sistemas de atenuación completos son los que trabajan conjuntamente con métodos pasivos.

Se tiene también que de todas las opciones, el algoritmo LMS (o alguna de sus mejoras), así como su aplicación en filtros de tipo FIR es la solución que se presenta con mayor frecuencia para casos comunes como ductos, auriculares, turbinas y motores.

Si bien el estudio y posibles aplicaciones de ANC se presentan hace varios años, recién en estos últimos se observan aplicaciones reales y comerciales con buenos resultados en autos, protectores auditivos, etc.

2.2. Control de Ruido

2.2.1. Definición de Ruido

Se define como ruido, todo sonido no deseado. Su efecto puede ser nocivo si sobrepasa los niveles adecuados (mayor a 110dB) ocasionando deterioro físico, psicológico y/o emocional aún cuando esté en los niveles aceptables de intensidad o porque conlleva una interferencia no deseada en señales de comunicación.

2.2.2. Tipos de Control de Ruido

2.2.2.1. Control de Ruido Pasivo

Emplea barreras o silenciadores que atenúan el ruido indeseable. Usan el concepto de cambio de impedancia, logrado mediante una combinación de baffles y tubos; estos silenciadores reciben el nombre de silenciadores reactivos, o el de pérdida de energía, causado por la propagación del sonido a través de un tubo de material absorbente de ruido (sonido), estos silenciadores se conocen como silenciadores resistivos. Los silenciadores reactivos se utilizan más en motores, mientras que los silenciadores resistivos son utilizados para ruidos en ductos de ventilación.

Son muy cotizados para ruidos con frecuencias de banda ancha, sin embargo son muy costosas, grandes e ineficientes para frecuencias bajas.

2.2.2.2. Control de Ruido Activo

Se presentan los siguientes sistemas:

FeedForward, se sensa la señal de referencia del ruido primario con anterioridad a la propagación de la señal antirruído a través de la bocina. Presenta dos categorías:

- A. Broadband feedforward (con sensor acústico)
- B. Narrowband feedforward (con sensor no acústico)

Feedback, no emplea señal de referencia de entrada para cancelar el ruido. [1] y [4]

Multiple-Chanel, la geometría del medio es complicada resultando insuficiente una sola fuente secundaria para cancelar el ruido primario sentido por micrófono de error.

2.2.2.3. Campo de Aplicación del Control Activo de Ruido

Desde un punto de vista geométrico, las aplicaciones del control activo de ruido se pueden clasificar en las cuatro siguientes categorías:

1. Ruido en ductos: ductos unidimensionales, como ductos de ventilación o aire acondicionado.
2. Ruido interior: ruido en un espacio cerrado
3. Protección auditiva personal: caso compacto del ruido interior.
4. Ruido al aire libre: ruido radiado en la intemperie o aire libre

Aplicaciones Específicas:

Industrial: ventiladores, ductos de aire, chimeneas, transformadores, compresores, bombas, sierras eléctricas, plantas ruidosas (en fuentes de ruido o varias zonas quietas), teléfonos públicos, audífonos.

Transportes: aviones, barcos, helicópteros, motocicletas, locomotoras, etc.

2.2.3. Aspectos Importantes sobre Filtros Digitales

2.2.3.1. Clases de Filtros

Los filtros usados generalmente en el desarrollo y/o estudio del control activo de ruido se explican a continuación:

FIR, Acrónimo en inglés para Finite Impulse Response o Respuesta finita al impulso. Se trata de un tipo de filtros digitales en los cuales si la entrada es una señal impulso, la salida tendrá un número finito de términos no nulos.

Pueden diseñarse para ser de fase lineal, lo cual conlleva a que presenten ciertas propiedades en la simetría de los coeficientes. Tiene especial interés en aplicaciones de audio, además son siempre estables.

Por el contrario, tienen la desventaja de requerir un orden mayor respecto a los filtros IIR para cumplir las mismas características, lo cual se traduce en un mayor gasto computacional.

IIR, Acrónimo en inglés para Infinite Impulse Response o respuesta infinita al impulso. Tipo de filtros digitales en los cuales si la entrada es una señal impulso, la salida tendrá un número infinito de términos no nulos, es decir, nunca vuelve al reposo.

Pueden cumplir las mismas exigencias de los filtros FIR con menos orden del filtro, lo cual representa menor carga computacional. Puede ser inestable, aún cuando se diseñan para ser estables.

No pueden diseñarse para tener fase lineal pero se pueden aplicar algunas técnicas como el filtrado bidireccional para lograrlo. [11]

2.2.3.2. Algoritmos Adaptativos

Debido al comportamiento no estacionario del ruido, es necesario el empleo de este tipo de algoritmos, lo cual implicará que los parámetros que caracterizan al filtro, tales como el ancho de banda, frecuencias, entre otros, cambian con el tiempo, esto es, los coeficientes de los filtros adaptativos cambian con el tiempo, en contraposición a los coeficientes de los filtros fijos cuyo comportamiento es invariante. A continuación una breve descripción de los algoritmos adaptativos más usados:

LMS (Least Mean Square), pertenece a la familia de los algoritmos de gradiente estocástico. Su importancia radica en que es un algoritmo muy simple, no requiere medidas de las funciones de correlación, ni tampoco inversión de la matriz de auto correlación.

RLS (Recursive Least Square), La convergencia no es exponencial como ocurre con el LMS sino es fija y proporcional al número de coeficientes a adaptar. Supera las prestaciones del algoritmo LMS; ya que emplea información contenida en muestras pasadas introduciendo a cambio un coste computacional mucho mayor.

KALMAN, proporciona estimaciones de la ecuación de estado a partir de la información disponible hasta el momento t (“condicionada” a la información disponible en t) y de la ecuación de medida, para posteriormente, corregir las estimaciones conforme se amplía la información disponible.

Lo hace interesante su habilidad para predecir el estado de un sistema en el pasado, presente y futuro, aún cuando la naturaleza precisa del sistema modelado es desconocida. [11]

2.2.3.3. Procesador digital de señales para Implementación de Filtros

Desde el punto de vista de la arquitectura interna, un Procesador digital de señales (DSP por sus siglas en inglés) es un microprocesador optimizado internamente para realizar los cálculos necesarios para implementar algoritmos de proceso de señal.

Esta optimización se consigue mediante algunos aspectos principales:

- Implementación de operaciones por hardware
- Instrucciones poco comunes que ejecutan varias operaciones en un solo ciclo
- Modos de direccionamiento especiales
- Memoria de programa “ancha” con más de 8 bits

La implementación de algunas operaciones mediante hardware consigue mejorar la velocidad media de cálculo, las instrucciones que se implementan son aquellas que se usan más a menudo.

La gran capacidad y velocidad de cálculo de un DSP puede utilizarse para implementar algoritmos digitales de control y, si el coste lo permite, otras labores realizadas tradicionalmente por microprocesadores

2.2.4. Transductores aplicados al Control Activo de Ruido

2.2.4.1. Transductores Acústicos

Micrófono, dispositivo que convierte señales en forma de ondas de presión acústicas en eléctricas.

Parlante, dispositivo que convierte señales eléctricas en acústicas generando ondas de presión.

2.2.4.2. Transductores No Acústicos

Tacómetro, dispositivo que indica la velocidad de rotación de un eje o una máquina en revoluciones por minuto.

Acelerómetro, instrumento de medida que proporciona lecturas de la variación de la aceleración (lineal o transversal) con el tiempo.

2.2.5. Martillo Neumático

Taladro percutor cuyo funcionamiento se basa en mecanismos de aire comprimido. El ruido que ocasiona puede llegar a sobrepasar los 100dB, lo cual constituye un riesgo de pérdida auditiva si el uso es continuo.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE RUIDO

UTILIZANDO EL ALGORITMO FXLMS

El capítulo 3, presenta la simulación del sistema con el algoritmo Fxlms, junto con la descripción del mismo. Se comentan las características que el sistema tiene y se definen los parámetros para la simulación en Matlab. Se presentan además pruebas simuladas en función a la variación de la señal de entrada, la deseada y el número de coeficientes, y luego se muestran los resultados obtenidos. Al final se concluye con un breve comentario del capítulo desarrollado.

3.1. Sistema de Control FeedForward FXLMS

3.1.1. Identificación del “Camino Secundario”

El empleo del sistema de control feedforward utilizando el algoritmo Fxlms implica la estimación de los efectos no lineales de los transductores y del campo acústico implicado para su compensación. (Conocido en inglés como “Secondary Path”, al cual en este trabajo se denominará “Camino Secundario”)

La metodología empleada para la estimación del “Camino Secundario” consiste en la generación de ruido blanco, el cual es emitido mediante el altavoz y simultáneamente grabado por medio del micrófono, estos datos serán procesados utilizando un filtro adaptante (LMS o variaciones) modelándose así el sistema $S(z)$. Una representación de los parámetros que abarca el “Camino Secundario” se presenta en la Figura 3.1

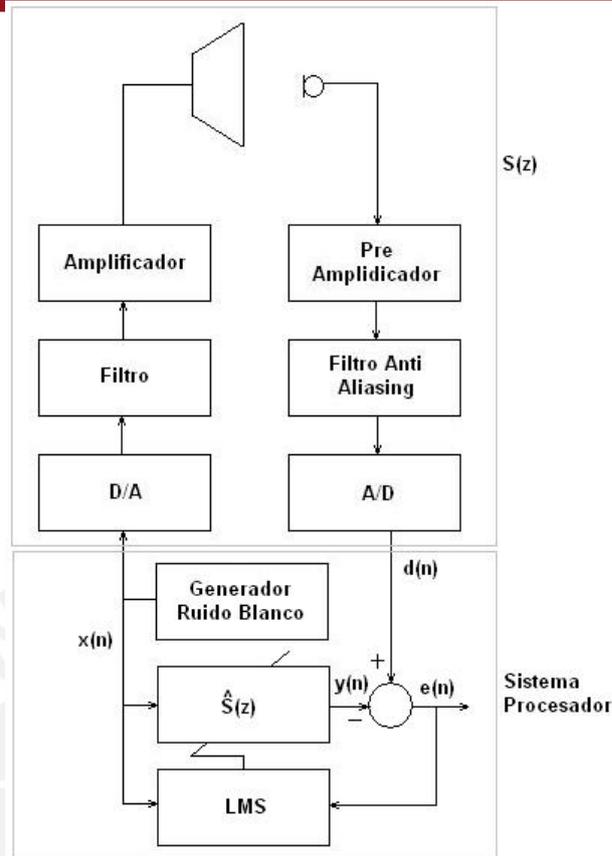


FIGURA 3.1 Representación del Camino Secundario

El modelo matemático para el proceso observado en la figura 3.1 es el siguiente:

Se tiene el arreglo vectorial $\mathbf{x}(n)$, obtenido de las muestras de la señal de ruido blanco generada, con una longitud igual a L (número de coeficientes del filtro):

$$\mathbf{x}(n) = [x(n) \quad x(n-1) \quad \dots \quad x(n-L+1)]^T \quad (3.1.1)$$

Este arreglo es procesado mediante el filtro adaptante $\mathbf{w}(n)$

$$\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \quad w_1(n) \quad \dots \quad w_{L-1}(n)]^T \quad (3.1.2)$$

Los coeficientes de $\mathbf{w}(n)$ variarán mediante el algoritmo LMS (o variantes) de la forma:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu e(n) \mathbf{x}(n) \quad (3.1.3)$$

Como resultado del procesado de $\mathbf{x}(n)$ con el filtro $\mathbf{w}(n)$ se obtiene $y(n)$:

$$y(n) = \mathbf{x}^T \mathbf{w}(n) \quad (3.1.4)$$

Por último se tiene que el error calculado por muestra el cual es utilizado en el filtro adaptante es:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (3.1.5)$$

3.1.2. Sistema y Algoritmo a Simular

El sistema que se simulará será el FxIms, del cual se presenta un esquema en la figura 3.2 donde se pueden apreciar los elementos del sistema de control.

Dado que el sistema se plantea para auriculares, se tendrán dos canales independientes que trabajarán en simultáneo, por lo cual para fines de simulación se trabajará solo uno de ellos debido a que el otro resulta idéntico en funcionamiento; por lo tanto los resultados obtenidos en uno de ellos serán válidos para ambos.

Los bloques cuyos nombres son \hat{S}_1 y \hat{S}_2 , representan cada uno respectivamente la estimación del “Camino Secundario” individual para cada canal, cuya explicación y estimación se trató anteriormente.

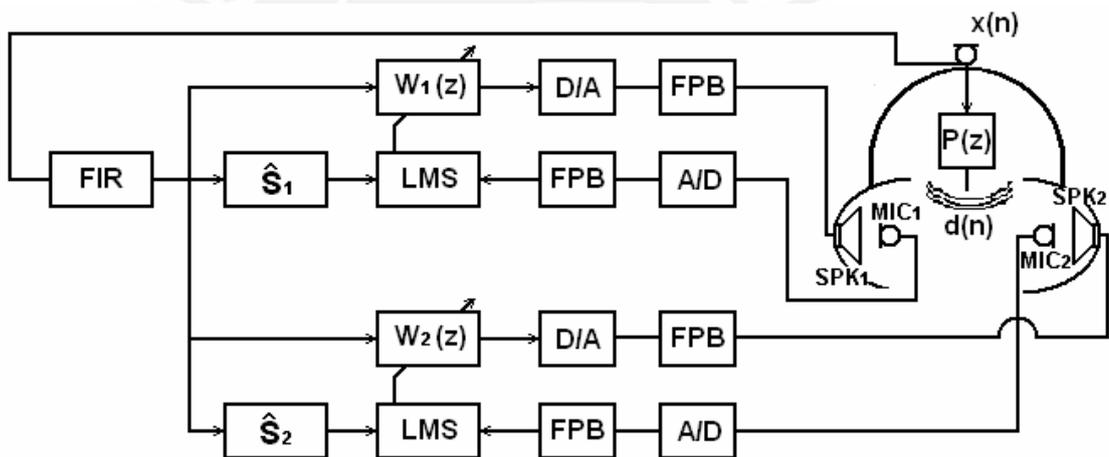


FIGURA 3.2 Esquema del sistema de control FxIms

El filtro FIR inicial en la figura 3.2, tiene como fin limitar el ancho de banda de la señal de referencia con lo cual el sistema actuará solo en dicho ancho de banda.

Se presenta además en la figura 3.3 el diagrama de bloques de la figura 3.2 con el objetivo de simplificar y de aproximarse al modelo matemático, el cual a su vez se explicará brevemente.

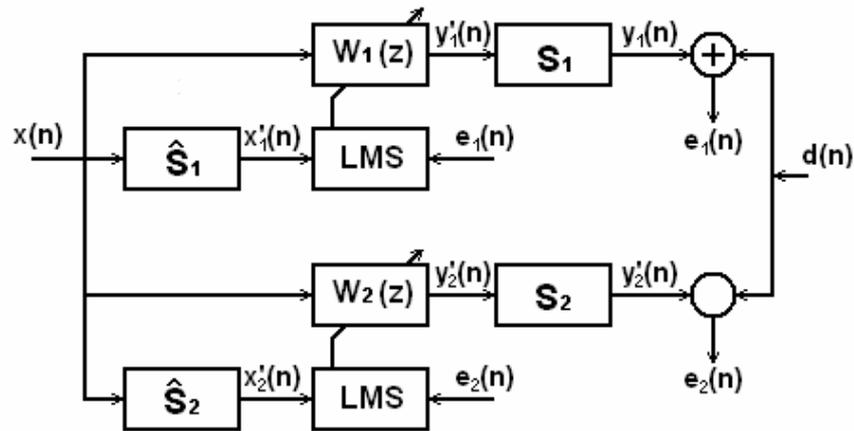


FIGURA 3.3 Diagrama de bloques de la figura 3.2

$S(z)$	Función de transferencia entre entrada x y salida y (Camino Secundario)
$\hat{S}(z)$	Estimación de la función de transferencia $S(z)$
$x(z)$	Señal de referencia
$x'(z)$	Señal de transferencia filtrada por $\hat{S}(z)$
$w(z)$	Filtro adaptante
$y(z)$	Salida del filtro adaptante $w(n)$
$y'(z)$	Señal acústica que alcanza la zona de superposición
$e(z)$	Error debido al filtro adaptante

Tabla 3.1 Descripción de Figura 3.3

El sistema mostrado presenta solo una señal de referencia llamada $x(n)$, siendo esta la última muestra tomada; sin embargo para el correcto funcionamiento del sistema, esta señal es procesada como un arreglo vectorial de L muestras (L es el orden del filtro $w(n)$), de la siguiente forma:

$$\mathbf{x}(n) = [x(n) \quad x(n-1) \quad \dots \quad x(n-L+1)]^T \tag{3.1.6}$$

Luego $x(n)$ es filtrado por $\hat{S}(z)$ resultando $x'(n)$:

$$\mathbf{x}'(n) = \hat{S}(n) \mathbf{x}(n) \tag{3.1.7}$$

El filtro adaptante FIR regido por el algoritmo LMS es un arreglo vectorial de coeficientes:

$$\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \quad w_1(n) \quad \dots \quad w_{L-1}(n)]^T \tag{3.1.8}$$

De lo cual se tiene que la salida $y'(n)$ debida al algoritmo adaptante será:

$$y'(n) = \mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}'(n) \tag{3.1.9}$$

Entonces la señal acústica $y(n)$ que llega a la zona de superposición, muestra la siguiente relación con $y'(n)$:

$$y(n) = S(n) * y'(n) \tag{3.1.10}$$

En base a lo anterior y al ruido que se presenta en el espacio de control ($d(n)$), se obtiene que el error es:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (3.1.11)$$

Como último punto, se presenta la ecuación que rige el modo en que varían los coeficientes del filtro adaptante mediante el algoritmo LMS:

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \mu [x'_i(n) e(n)] \quad (3.1.12)$$

3.2. Características del Ruido Generado por el Martillo Neumático

La señal sonora generada por el martillo neumático se muestra en la figura 3.4, ahí se observa que la forma de onda describe cierta periodicidad; siendo esto un indicio de que el ruido emitido por dicha herramienta podría presentar una componente debida a una frecuencia fundamental.

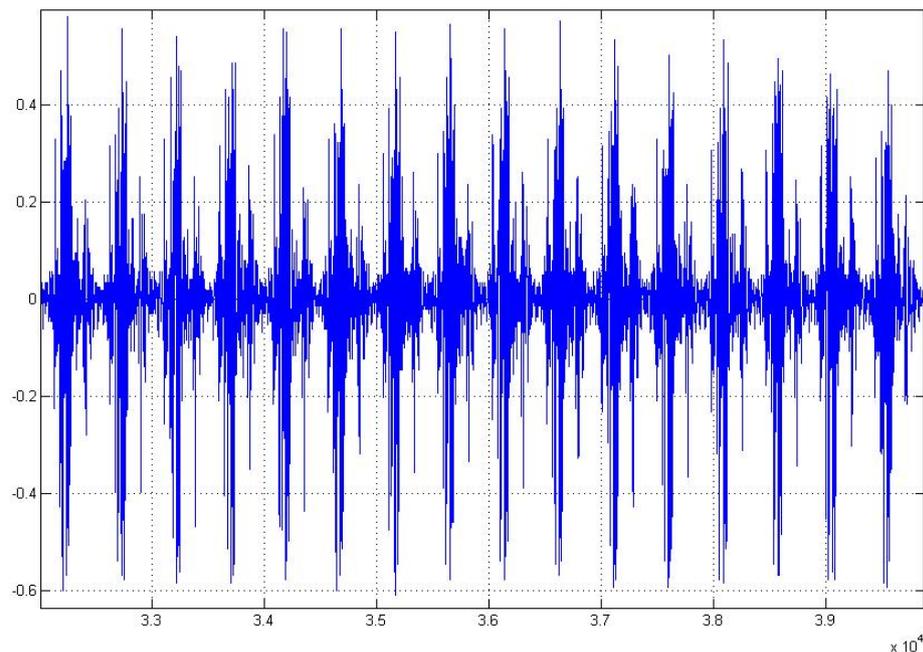


FIGURA 3.4 Señal del ruido generado por un martillo neumático

Dicha hipótesis se comprueba en base al periodograma de la señal (figura 3.5), donde se observa una frecuencia fundamental que bordea los 16.48Hz y sus respectivos armónicos.

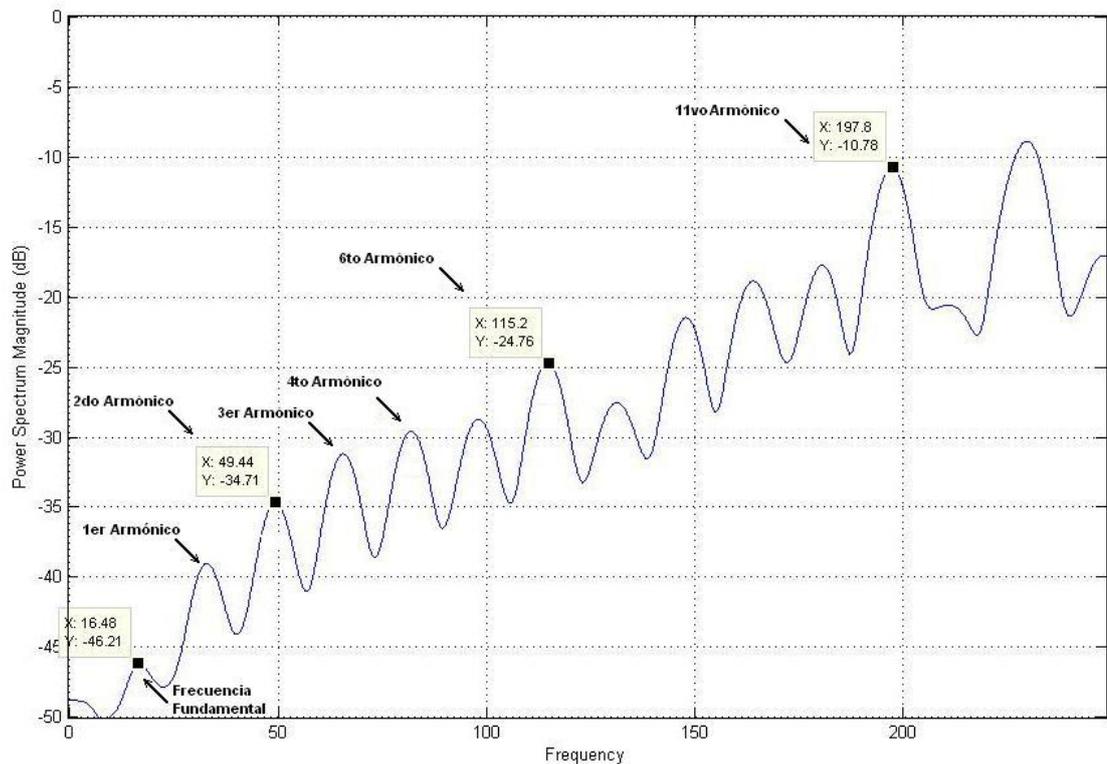


FIGURA 3.5 Periodograma del ruido del martillo neumático (Rango de 0Hz a 250Hz)

Cabe indicar que con el fin de mostrar la señal, frecuencia fundamental y los armónicos, se acotó el rango del periodograma de 0 a 250hz, sin embargo se observan armónicos superiores a esa cota, como se verá más adelante.

Del análisis anterior, se concluye que es factible el empleo de una señal de referencia proveniente de un sensor no acústico; con lo cual, cobran importancia los métodos posibles a utilizar para medir la frecuencia fundamental.

En particular, para un martillo neumático se presenta la siguiente fórmula para determinar la frecuencia de golpe, llámese también frecuencia fundamental [19]:

$$z^2 = \frac{2 * k * p * S}{m * l} \tag{3.2.1}$$

z	Frecuencia de golpe o frecuencia fundamental
k	Coefficiente correspondiente al frotamiento
p	Presión efectiva de admisión
S	Sección del pistón en m ²
m	Masa del pistón
l	Longitud de carrera

Tabla 3.2 Leyenda de la ecuación 3.2.1

Todos estos parámetros se mantienen fijos con excepción de la presión efectiva de admisión (p), que varía debido a que algunas de estas herramientas poseen válvulas de control de aire instaladas. Por tanto, mediante la medición de la presión efectiva y con el conocimiento de los parámetros mencionados, se logrará medir de la frecuencia fundamental. Sin embargo, la complejidad para obtener estas mediciones, implicará que solo se podrá observar que tan efectivo resultaría un sensor no acústico mediante la simulación de una señal entrada representada por pulsos a la frecuencia fundamental.

3.3. Determinación de Parámetros Relevantes para la Simulación

Como se vio anteriormente, ciertas funciones de transferencia y valores propios del filtro adaptante son requeridos para la simulación del sistema de control (figura 3.2).

Estos parámetros se observan en el cuadro 3.3.

FIR	Filtro inicial, para discriminar el ancho de banda a atenuar
P(z)	Función de transferencia entre la señal de referencia y deseada
L	Número de coeficientes del filtro adaptante
S	Función de transferencia del Camino Secundario

Tabla 3.3 Parámetros requeridos para simulación

3.3.1. Filtro FIR inicial para filtrado previo de la señal de referencia

La función de este filtro será reducir el ancho de banda de la señal de referencia, reduciendo de este modo el ancho de banda de la señal de control. Los parámetros de dicho filtro se observan en el cuadro 3.4. Con esto se desea observar si al reducir el ancho de banda se aumenta la eficiencia del sistema de control.

Filtro	FIR
Tipo de Filtro	Pasa Bajo
Tipo Digital	Fase Lineal
Frecuencia de muestreo	8000Hz
Frecuencia de corte de rechazo	2000Hz
Orden	64
Método de diseño	Método de Ventanas (Hamming)

Tabla 3.4 Parámetros del filtro FIR inicial

3.3.2. Función de transferencia $P(z)$

Como se vio en la figura 3.2, $P(z)$ es la función de transferencia que entre $x(n)$ y $d(n)$, (entre el exterior e interior del sistema de auriculares). La figura 3.6 ilustra el modo por el cual $P(z)$ es modelado. El procedimiento matemático es idéntico al presentado para la obtención del Camino Secundario. (ecuaciones de 3.1.1 a 3.1.5).

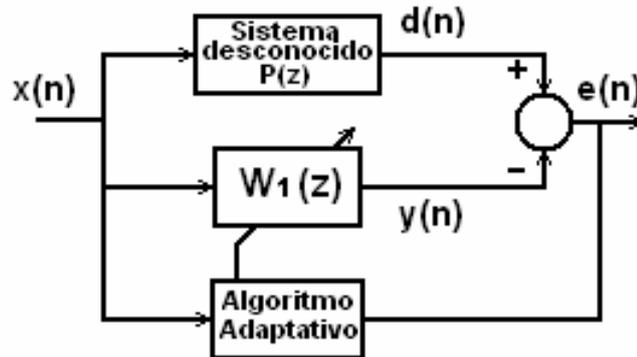


FIGURA 3.6 Estimación de $P(z)$

Para dicho modelamiento, se emitió ruido blanco mediante un parlante, el cual fue grabado por ambos micrófonos. La data grabada de los micrófonos se procesó mediante un filtro adaptante Lms normalizado con lo cual se obtuvieron los coeficientes de $P(z)$ (figura 3.7). Cabe indicar que el modelamiento de $P(z)$ involucró también la cavidad auditiva, pues las mediciones se hicieron con el sistema de auriculares colocados en un individuo real. El procedimiento en Matlab se encuentra en el Anexo N°6.

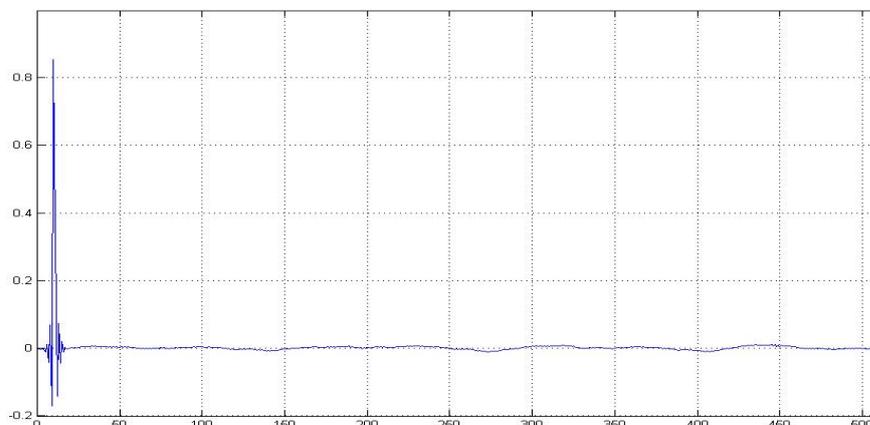


FIGURA 3.7 Coeficientes estimados de $P(z)$

3.3.3. Función de transferencia del Camino Secundario (S)

Para la generación de la señal de ruido necesaria para la estimación del camino secundario, se usó el software Matlab. Así también, el proceso de emisión y grabación del ruido se desarrolló mediante funciones en Matlab. Dicho proceso permitió observar que entre la señal emitida y la señal recibida se generaba un retraso de aproximadamente 30ms (figura 3.8); valor al cual se llegó en base a la comparación de pruebas sucesivas, dado que el sistema variaba la velocidad de operación dependiendo del estado de ocupación del CPU. Este retardo ocurre principalmente debido a los siguientes factores:

- Computador (Filtros y amplificadores)
- Transductores (Parlante y micrófono)
- Entorno acústico en la orejera y la cavidad auditiva.

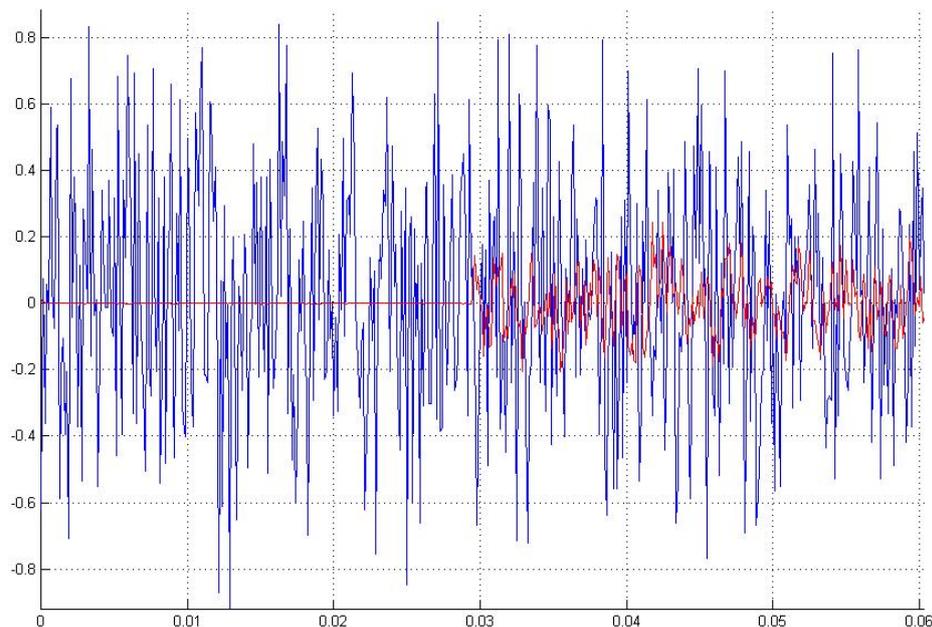


FIGURA 3.8 Retraso debido al Camino Secundario

Obtenida la grabación, se aplicó el filtro adaptante Lms normalizado y se modeló el Camino Secundario. Se observa en la figura 3.9 el resultado de aplicar el filtro adaptante y el error generado. Procedimiento en Matlab en el Anexo N^o7.

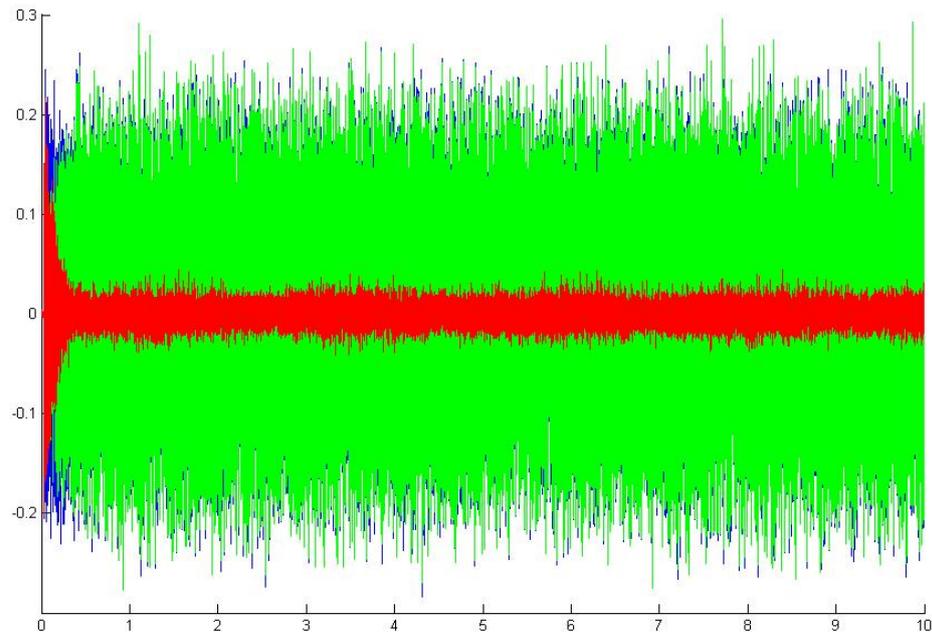


FIGURA 3.9 Error de estimación del Camino Secundario

Del mismo modo que al estimar $P(z)$, este procedimiento se realizó colocando el sistema de auriculares en una persona.

3.3.4. Coeficientes del Filtro Adaptante

Para calcular el número de coeficientes de un filtro FIR, es necesario contar con la frecuencia de muestreo y el máximo desfase que se quiera lograr. Con ambos datos se puede tener el número de coeficientes a usar de la siguiente forma:

$$M = Td F_s \quad (3.2.2)$$

Donde M es el número de coeficientes, Td el desfase en el tiempo y F_s la frecuencia de muestreo.

Teóricamente el controlador manejará frecuencias de hasta 16Hz y si se desea generar un desfase de onda completa, se requerirá de 500 coeficientes.

En base a lo anterior, se implementara el filtro con 512 coeficientes y además, para experimentar y observar cuanto mejora la eficiencia del sistema, también se trabajará con 1024 coeficientes.

3.4. Sistema de Auriculares para Simulación

3.4.1. Implementación de Sistema de Auriculares

Tal como se refirió en el punto 3.3 Se implementó un sistema de auriculares para la estimación de factores como $P(z)$ y el Camino Secundario $S(z)$. Para ello se contó principalmente con:

- Protector auditivo marca ARSEG modelo 9-080 tipo orejera
- Bocinas marca JVC modelo HA-D525
- Micrófono electret 9767
- Cable apantallado Belden 8451

Estos componentes se acondicionaron manualmente y el prototipo resultante se utilizó en las simulaciones (Figura 3.10).



FIGURA 3.10 Sistema de Auriculares acondicionado para Simulaciones

En lo que respecta a la posición ideal del micrófono, se optó por colocarlo frente al altavoz y encajado en la orejera del protector auditivo. Se tuvo el cuidado de colocarlo a la distancia más cercana al oído posible (Figura 3.11) para de este modo el ruido de error capturado sea el más aproximado al que la persona escuche.



FIGURA 3.11 Posición del micrófono en el auricular y en relación al oído

3.5. Simulación en Matlab-Simulink

Para las simulaciones, se optó por el uso de la herramienta Simulink de Matlab en lugar del lenguaje en código de dicho software. Las ventajas que presenta Matlab Simulink son:

- Simulación del sistema completo en un solo paso.
- Facilidad para seleccionar mediante interruptores el bloque a simular.
- Distribución en bloques que facilita la comprensión del sistema en relación a los diagramas de bloques mostrados en este capítulo.

El Diagrama 3.1 muestra el sistema a simular y el cuadro 3.5 detalla los componentes del mismo. Los diversos colores ayudan a diferenciar con mayor claridad cada una de las etapas.

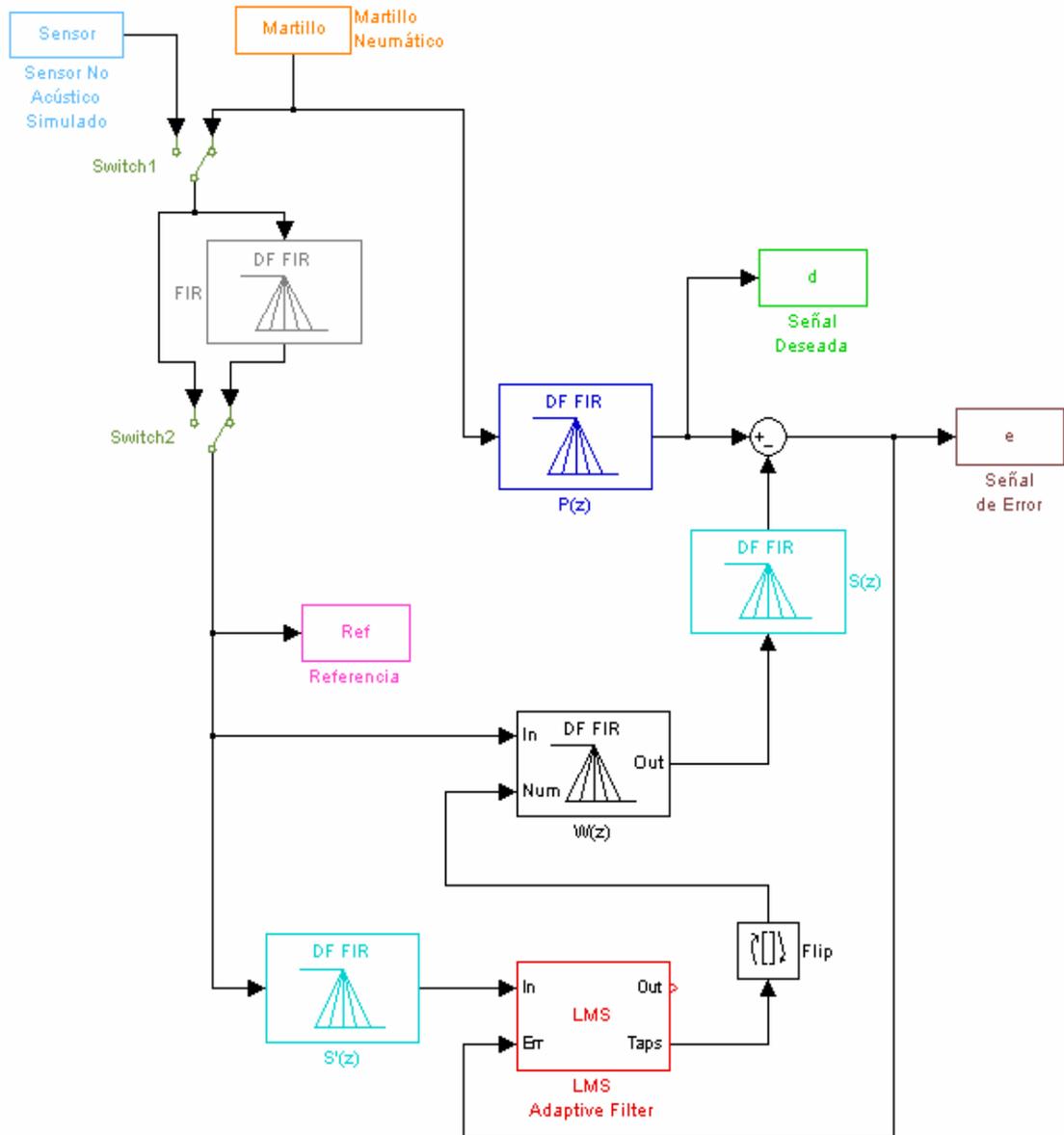


FIGURA 3.1 Sistema $FxIms$ en Matlab Simulink

Nombre	Función	Color
Filtro Adaptativo LMS	Filtro adaptante cuya entrada es la señal de referencia $x(k)$ y la señal de error $e(k)$. Genera la salida $y(k)$, que es la señal de control del sistema. En conjunto con S y \hat{S} se realiza el sistema Fx_{lms}	Rojo
S, \hat{S}	Función de transferencia del Camino Secundario y su estimación	Cyan
Martillo	Señal obtenida de la grabación de un martillo neumático en operación.	Naranja
Sensor no Acústico	Señal que simula un sensor no acústico mediante el cual se obtiene la frecuencia fundamental del martillo neumático. Esta señal se representa mediante pulsos definidos a la frecuencia fundamental del martillo neumático.	Celeste
d	Señal deseada, obtenida del paso de la señal de ruido (Martillo) por el sistema $P(z)$.	Verde Claro
e	Señal de error, resultante de la resta de la señal deseada $d(k)$ y la de control $y(k)$.	Marrón
ref	Señal de referencia $x(k)$ que ingresa al sistema de control.	Margeta
$P(z)$	Función de transferencia del protector auditivo en conjunto con la cavidad auditiva.	Azul
Filtro FIR	Filtro inicial que restringe el ancho de banda de la señal de referencia, restringiendo de ese modo el ancho de banda de la señal de control	Gris
Switch 1	Selecciona si se toma como señal de referencia el sensor no acústico simulado o el ruido del martillo.	Verde Oscuro
Switch 2	Permite seleccionar si la señal de referencia se filtrará por el filtro previo FIR o no.	Verde Oscuro

Tabla 3.5 Descripción de diagrama 3.1

3.6. Organización de Pruebas

En este punto se presentan las simulaciones del sistema en general, donde se variarán diversos parámetros para cada caso de simulación. Se obtendrán resultados para dos cantidades distintas de coeficientes y condicionadas al uso o no del filtro FIR inicial. Terminadas las simulaciones se tendrán parámetros apropiados para el sistema. Se muestra en el cuadro 3.6 la organización de las pruebas y en el cuadro 3.7 los objetivos de las mismas.

Nº. de Prueba	Señal de Referencia	Nombre de Variable	Filtro Inicial	Ruido	Nombre de Variable	Nº. de Coef.
1a	Sensor No Acústico Simulado	Sensor	FIR SIN/CON	Martillo Neumático	Martillo	512
1b	Sensor No Acústico Simulado	Sensor	FIR SIN/CON	Martillo Neumático	Martillo	1024
2a	Martillo Neumático	Martillo	FIR SIN/CON	Martillo Neumático	Martillo	512
2b	Martillo Neumático	Martillo	FIR SIN/CON	Martillo Neumático	Martillo	1024

Tabla 3.6 Pruebas a Realizar

Prueba	Ref/Ruido	Comentario
1	Sensor/Martillo	Tiene como fin observar cuan eficiente resulta un sensor no acústico en el sistema. Se espera que se atenúen eficazmente los armónicos de la frecuencia fundamental.*
2	Martillo/Martillo	Se pretende observar los resultados del sistema con una señal de referencia acústica.*

*Las pruebas con 1024 coeficientes tienen como énfasis, observar cuanto mejora la atenuación con respecto a 512 coeficientes, en base a la hipótesis de que más coeficientes podrían modelar mejor el sistema y a su vez atenuar mejor el ruido.

[17]

Tabla 3.7 Objetivos de las Pruebas

3.7. Resultados

3.7.1. Número de coeficientes y filtro FIR de entrada

En lo concerniente al número de coeficientes del filtro adaptante, la hipótesis de que aumentando los coeficientes se disminuiría el error no fue correcta, pues el error resultante trabajando con 1024 coeficientes fue similar que con 512 coeficientes (Anexos N^o1,2,3,4). Además, según las pruebas 2b, si se desea una respuesta de error que con 1024 coeficientes no supere al error con 512 coeficientes, se tendría que disminuir el factor de convergencia (μ) ralentizando el sistema (Anexo N^o5).

Con respecto al filtro FIR a la entrada del sistema, su uso en las pruebas, tanto la de referencia de sensor no acústico y la de referencia de micrófono, no se justifica pues no contribuye al sistema significativamente.

3.7.2. Señal de referencia

En este apartado se mostrarán las pruebas 1a sin filtro FIR y 2a sin filtro FIR debido a que en ellas se logró con mayor eficacia la atenuación del ruido, resaltando que cada una procesa una señal de referencia distinta.

3.7.2.1. Prueba 1a sin filtro inicial FIR

Se muestra en primer lugar los armónicos producidos por el sensor no acústico representado por una señal de pulsos (Figura 3.12).

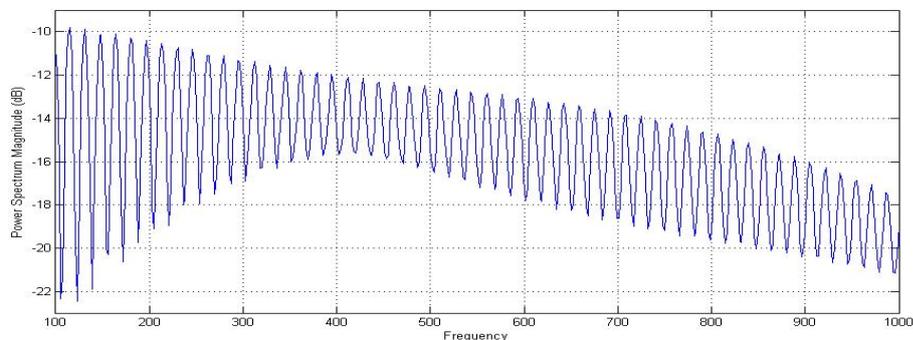


Figura 3.12 Armónicos producidos por el sensor no acústico simulado

Se observa de la grafica anterior (Figura 3.12) que la señal de pulsos a la frecuencia fundamental posee armónicos bien definidos. Esto resulta favorable pues los armónicos de la señal de referencia que estén mejor definidos, atenuarán con mayor eficacia a los armónicos correspondientes de la señal de ruido. [17]

Comparando las señales deseada y de error (Figura 3.13) se obtiene el cuadro 3.7 donde se muestra la diferencia en decibelios entre ellas. Están en cursiva las atenuaciones mayores a 3dB.

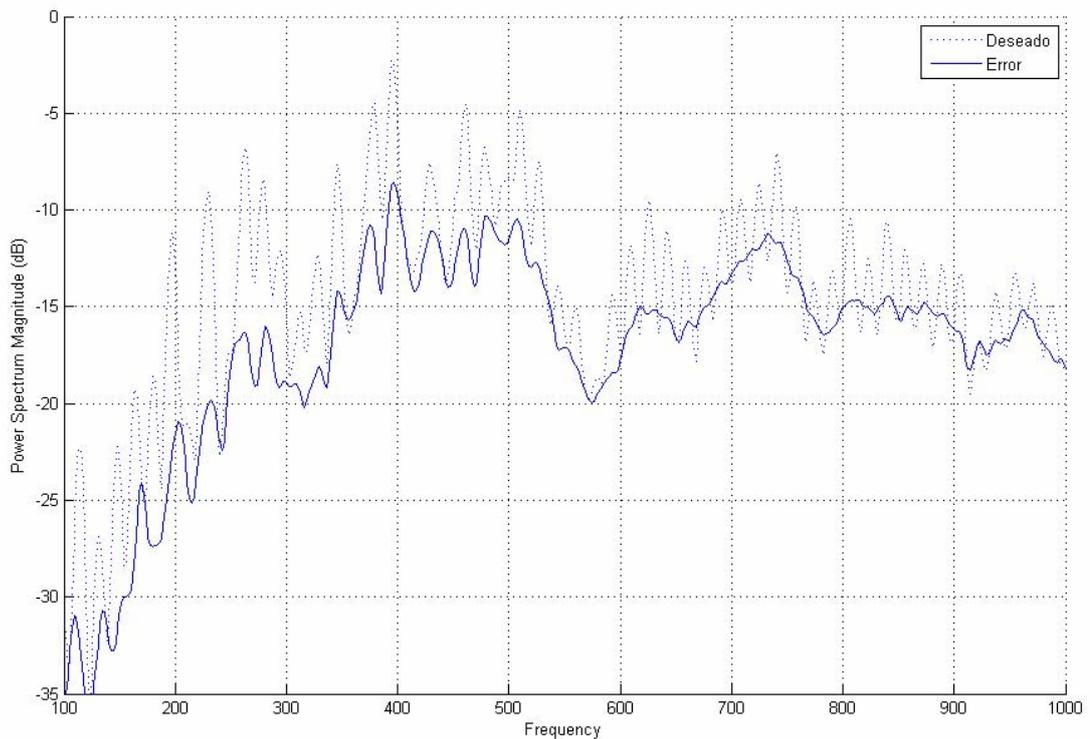


Figura 3.13 Periodograma de las señales de error y deseada

Armónico	6to	7mo	8vo	9no	10mo	11vo	13vo	15vo	16vo	17vo	18vo	19vo
Atenuación dB	9.58	4.45	9.36	6.75	9.6	11.74	10.74	9.7	7.7	6.65	4.25	6
Armónico	20vo	22vo	23vo	25vo	27vo	28vo	29vo	30vo	31vo	32vo	33vo	35vo
Atenuación dB	7.1	6.3	6.2	3.67	6.58	3.85	3.44	5.77	5.44	3.1	3.3	4.1
Armónico	36vo	37vo	38vo	39vo	40vo	41vo	42vo	43vo	44vo	45vo	46vo	47vo
Atenuación dB	4.31	5.86	4.5	2.97	2.1	3.35	2.98	3.24	4.55	3.9	1.86	2.59
Armónico	48vo	49vo	50vo	51vo	52vo	53vo	54vo	55vo	56vo	57vo	58vo	59vo
Atenuación dB	4.1	2.65	3.85	2.57	1.8	2.69	3.36	0	2.26	2.54	2.17	2.65
Factor de Convergencia (μ) : 0.1												

Tabla 3.7 Niveles máximos de atenuación por armónico

3.7.2.2. Prueba 2a sin filtro inicial FIR

Se observa en la figura 3.14 los periodogramas sobrepuestos de las señales deseada y de error, en las cuales se aprecia la disminución de intensidad en decibelios que presenta dicho ruido. El nivel de atenuación de cada armónico se detalla en el cuadro 3.8.

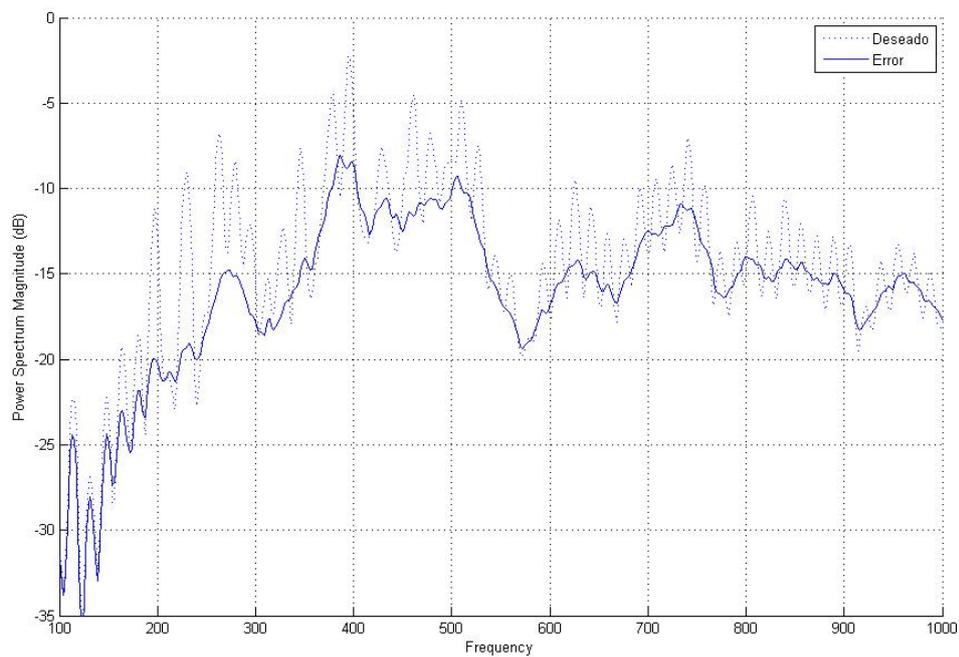


Figura 3.14 Periodograma de las señales de error y deseada

Armónico	6to	7mo	8vo	9no	10mo	11vo	13vo	15vo	16vo	17vo	18vo	19vo
Atenuación dB	2.4	1.21	2.11	3.75	3.25	8.79	10.16	8.67	6.7	5.3	2.5	4.73
Armónico	20vo	22vo	23vo	25vo	27vo	28vo	29vo	30vo	31vo	32vo	33vo	35vo
Atenuación dB	7.29	5.34	6.5	3.52	7.1	3.87	2.3	5	5.3	1.68	2.4	2.79
Armónico	36vo	37vo	38vo	39vo	40vo	41vo	42vo	43vo	44vo	45vo	46vo	47vo
Atenuación dB	3.74	4.9	3.8	2.97	2.5	3.36	3.3	3.5	4.2	3.7	2.57	1.87
Armónico	48vo	49vo	50vo	51vo	52vo	53vo	54vo	55vo	56vo	57vo	58vo	59vo
Atenuación dB	3.69	2.68	3.59	2.12	2.5	2.21	2.96	1	1.8	1.75	1.73	1.76
Factor de Convergencia (μ) : 0.04												

Tabla 3.8 Niveles máximos de atenuación por armónico

Las gráficas mostradas se han tomado en el rango de 100Hz a 1000Hz, debido a que el rango de operación de los altavoces presenta una frecuencia de operación apropiada en ese rango. Se colocan en cursiva las atenuaciones mayores a 3dB, pues constituyen una atenuación que sobrepasa la mitad de la intensidad del ruido.

3.8. Comentarios

Se han presentado las simulaciones con menor error obtenido, de donde la prueba 1a presenta un factor de convergencia que dobla el factor de convergencia de la prueba 2a ($\mu_{1a} > \mu_{2a}$). Así también la atenuación obtenida en el rango de frecuencias de 100Hz a 200Hz (6to y 11vo armónico) supera ampliamente la atenuación obtenida en la prueba 2b. Siendo esto un indicador de que el sistema simulado en 1a es más eficiente que el sistema en 2a

Otro punto a favor del sistema 1a sin filtro FIR inicial, es que como se observa en la figura 3.13, el error generado no adiciona ruido al sistema, en cambio en la figura 3.14 de la prueba 2a se adiciona ruido al sistema en frecuencias intermedias a los armónicos de la señal.

Como dato adicional en la prueba 1a únicamente en 13 de los armónicos la atenuación no supera los 3db comparado con 21 armónicos de la prueba 2a.

CAPÍTULO 4

PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN Y COSTO

En el capítulo 4 se definen los parámetros para la selección del hardware apropiado en base a los resultados de las simulaciones. Se describe las características del sistema y la arquitectura propuesta para su desarrollo. También se realiza una propuesta de costos de prototipo, así como una propuesta ligera de implementación en serie con fines comparativos.

4.1. Parámetros en la implementación de un sistema de control activo de ruido

Diversos parámetros han de tomarse en cuenta para la implementación de un sistema de control activo de ruido, los cuales contribuirán a una futura selección del hardware apropiado para dicha tarea. Para este proyecto en particular se seleccionará el hardware en base a los siguientes criterios:

- Número de multiplicaciones adiciones por segundo (MACS)
- Aritmética de punto fijo o punto flotante
- Memoria Requerida
- Cuantización de parámetros (datos, coeficientes)
- Frecuencia de Muestreo
- Coste del sistema prototipo

4.1.1. Número de multiplicaciones adiciones por segundo (MACS)

El sistema de control tiene dos bloques importantes el filtro previo de señal de referencia y el filtro adaptante (Fx-lms).

FILTRO PREVIO DE LAS SEÑALES DE REFERENCIA

En base a la representación matemática del filtro FIR previo:

$$y(n) = \sum_{l=0}^{\infty} h(l)x(n-l). \quad (4.1.1)$$

Se puede observar que el número de multiplicaciones adiciones requeridas para esta operación matemática es igual al valor máximo tomado por l , siendo l la cantidad de coeficientes del filtro digital. Por lo tanto se tiene la siguiente relación:

$$l \times F_s = \text{MACS} \quad (4.1.2)$$

Dado que l es 512 y que F_s es 8000; para cada filtro las MACS son 4096000.

FILTRO ADAPTANTE FX-LMS

En el filtro adaptante se observa que la representación matemática para la actualización de coeficientes es:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu e(n) \mathbf{x}(n) \quad (4.1.3)$$

Donde se cumple también la fórmula 4.1.2. Resultando 4096000 MACS.

Otro punto con respecto al filtro adaptante es el Filtro FIR en el cual se filtra la señal de referencia, con los coeficientes determinados:

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n)x(n-l). \quad (4.1.4)$$

se observa que así como en el filtro FIR previo, también la ecuación 4.1.2 se cumple y se tienen 409600MACS

Por lo tanto, dado que solo se tiene un filtro previo y que al ser un sistema de audífonos con micrófonos de error separados, debe calcularse parámetros del filtro adaptante distintos para ambos oídos. Con lo cual se tiene:

$$1 \text{ Filtro Referencia (MACS)} + 2 \text{ Filtros Adaptante FIR (MACS)} = \text{MACS totales} \quad (4.1.5)$$

$$\text{MACS totales} = 20480000 \text{ (20.480 MMACS, millones de MACS)}$$

4.1.2. Aritmética de punto fijo o punto flotante

Son métodos de representación numérica y existen procesadores para ambos métodos, siendo por lo general los de punto fijo de costo menor a los de punto flotante.

Un punto a tomar en consideración en la aritmética de punto fijo es que introduce desajustes en el funcionamiento del sistema de control, en comparación a la fase de simulación. Dichos errores pueden ser de dos tipos:

1. Errores de cuantización
 - a) Cuantización de señal
 - b) Cuantización de coeficientes
2. Errores de aritmética
 - a) Ruido de redondeo (truncamiento)
 - b) Saturación

Sin embargo los procesadores de aritmética de punto fijo presentan las siguientes ventajas:

- Baratos
- Pequeños
- Menor consumo [18]

En base a estas ventajas y debido a que se desea un costo reducido para el sistema, se optará por un procesador de aritmética de punto fijo.

4.1.3. Memoria Requerida

Para obtener un estimado de la memoria requerida, se debe determinar la cuantización que se empleará para datos y coeficientes. Para este caso en particular se optará por un tamaño de palabra para los datos de 24bits, lo cual reducirá los efectos resultantes de los desajustes generados al usar la aritmética de punto fijo en el procesador.

La ecuación 4.1.6 muestra el modo de calcular la memoria.

$$\frac{NBITS \cdot L}{8 \cdot 1024} \text{ en Kb} \quad (4.1.6)$$

MEMORIA RAM

Se tienen en consideración las señales variantes en el tiempo, las cuales son:

1. Señal de referencia ($x(n)$)

$$x(n) = [x(n) \quad x(n-1) \quad \dots \quad x(n-L+1)]^T$$

;n = tiempo específico, L = orden del filtro adaptante.

Para $x(n)$ se necesita 1.5Kbytes.

2. Señales resultante ($y(n)$)

Por cada tiempo n se obtendrá un solo valor de y, por tanto para y se requerirá 3bytes.

3. Señal de error ($e(n)$)

Por cada tiempo n se obtendrá un solo valor de e, por tanto para e se requerirá 3bytes.

4. Coeficientes del filtro adaptante ($w(n)$)

Se necesitará 1.5Kbytes.

5. Coeficientes de la estimación del camino secundario ($s(n)$)

Se requiere 1.5Kbytes.

Puesto que se trabajará con auriculares se tendrá dos señales $y(n)$, $e(n)$, $w(n)$ y $s(n)$ operando casi simultáneamente, con lo cual la memoria RAM total requerida será de 41024bits (5Kbytes)

MEMORIA ROM

Se tienen en consideración los datos que no varían:

1. Coeficientes del filtro previo

Se rige también por la ecuación 4.1.6. Se necesitan 1.5Kbytes

2. Código del programa realizado. Este ítem no se tendrá en cuenta para la estimación de la memoria, sin embargo para la selección del DSP se tomará como requisito la posibilidad de conexión de memoria adicional.

4.1.4. Frecuencia de Muestreo

La frecuencia de muestreo será de 8Khz, puesto que la señal tratada es de baja frecuencia y por lo general es el mínimo valor al cual trabajan los códecs de audio.

4.1.5. Ciclo de instrucción del procesador

El ciclo de instrucción debe ser extremadamente bajo (orden de los nanosegundos) para poder realizar el mayor número de operaciones que requiere el algoritmo en un tiempo no mayor del periodo de muestreo (orden de los milisegundos).

4.1.6. Coste del sistema prototipo

Se optará por recomendar los equipos o dispositivos cuyo costo sea menor y que cumplan los requerimientos técnicos presentados.

4.2. Selección de arquitectura DSP

El sistema de control activo de ruido propuesto ha de implementarse en un procesador digital de señales (DSP) para su trabajo en tiempo real. El dispositivo DSP es un procesador cuyo hardware está optimizado para ejecutar algoritmos típicos de procesamiento de señal, tales como filtros FIR, algoritmos adaptantes, etc.

Los parámetros que se considerarán en la elección del DSP óptimo para esta aplicación específica, son:

- Millones de multiplicaciones adiciones por segundo (MMACS)
- Frecuencia de reloj
- Cálculo de coma fija
- Dispositivos o periféricos compatibles al entorno DSP
- Software de programación disponible(lenguaje ensamblador y de alto nivel)
- Librerías desarrolladas
- Coste del sistema DSP prototipo

Los DSP actuales superan ampliamente los requerimientos de MMACS del sistema antes propuesto, existiendo en el mercado diversas empresas fabricantes de estos dispositivos. Tres de las más reconocidas son:

Fabricante	Familia	Aritmética	Velocidad de Reloj
Texas Instruments	TMS320C24x	Fixed-point	40MHz
	TMS320C28x	Fixed-point	150MHz
	TMS320C54x	Fixed-point	160MHz
	TMS320C55x	Fixed-point	300MHz
	TMS320C62x	Fixed-point	300MHz
	TMS320C64x	Fixed-point	1GHz
Analog Devices	ADSP-218x	Fixed-point	80MHz
	ADSP-219x	Fixed-point	160MHz
	ADSP-BF5xx	Fixed-point	750MHz
Freescale	DSP56300	Fixed-point	275MHz
	DSP568xx	Fixed-point	40MHz
	DSP5685x	Fixed-point	120MHz
	MSC71xx	Fixed-point	200MHz
	MSC81xx	Fixed-point	400MHz

Tabla 4.1 Familias de DSP

Para la selección se consultaron los diversos sitios Web de cada empresa mencionada, siendo la empresa Texas Instruments la que ofrece un asesoramiento más detallado en la elección de una familia DSP específica para el diseño de sistemas de control activo de ruido. Dicha empresa recomienda la familia TMS320C55x.

Entre las ventajas ofrecidas por Texas Instruments se encuentran las librerías, compiladores de código C/C++, simuladores, emuladores, amplia documentación en manuales, periféricos, puertos, terminología empleada y aplicaciones diversas.

4.3. Propuesta de Implementación de Prototipo

Para la propuesta de implementación del prototipo, se optó por seleccionar una tarjeta DSP, pues ofrece una amplia gama ventajas como:

- Interfases
- Facilidad de programación
- Implementación y puesta en funcionamiento corta en comparación a un diseño de hardware.

Con esta premisa, se indagó sobre tarjetas DSP de diversos fabricantes, siendo la tarjeta de desarrollo TMDSDSK5510 de Texas Instruments la que se adecuó mejor a los requerimientos de sistema. Si bien otros fabricantes ofrecen tarjetas a menor costo y con capacidades de procesamiento adecuadas para el sistema planteado, la tarjeta elegida cuenta con terminales propios de audio, lo cual le da ventaja en aplicaciones de audio en comparación a otras tarjetas.

Algunas características de la tarjeta de desarrollo TMDSDSK5510, se proceden a mencionar y describir seguidamente:

- Códec Stereo de 24bits
- Cuatro jacks de 3.5mm para audio (micrófono, line in, speaker, line out)
- Memoria Flash externa de 256K words y 8 MB de memoria SDRAM

- Fuente de +5V
- Emplea el DSP TMS320C5510
- Amplificador interno para auriculares
- Pre-amplificador para Micrófono (No para Line-in)

4.3.1. DSP TMS320C5510

- Núcleo de punto fijo de 16bits, capaz de ejecutar una o dos instrucciones por cada ciclo máquina. (5ns)
- Frecuencia de reloj 200MHz
- Memoria RAM 256Kb
- Memoria ROM 32Kb
- Más de 400MMACS
- Dos unidades aritmético lógicas
- Software de programación C5510 DSK Code Composer Studio v2.12

El software Code Composer Studio presenta una versión gratuita para tarjetas de desarrollo, sin embargo fuera de estas su uso se restringe a una versión de prueba o a un pago anual de \$3595.18 por la versión completa y actualizada.

4.3.2. Códec de Audio Stereo 24Bits

El códec requerido debe tener 3 entradas y 2 salidas, dado que el equipo tendrá 2 micrófonos de error, uno de referencia y dos auriculares.

El códec empleado es el TLV320AIC23B, cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura 4.1, el fabricante es Texas Instruments. Algunas características importantes de este códec son:

- Frecuencia de muestreo, de 8Khz hasta 96Khz.
- Resolución (Bits), 24 bits
- Entradas/Salidas, 3 / 4

- Interfase de Audio, DSP, I2S
- Interfase de control I2C
- SNR DAC / SNR ADC (dB), 100 / 90
- Amplificador integrado para auriculares

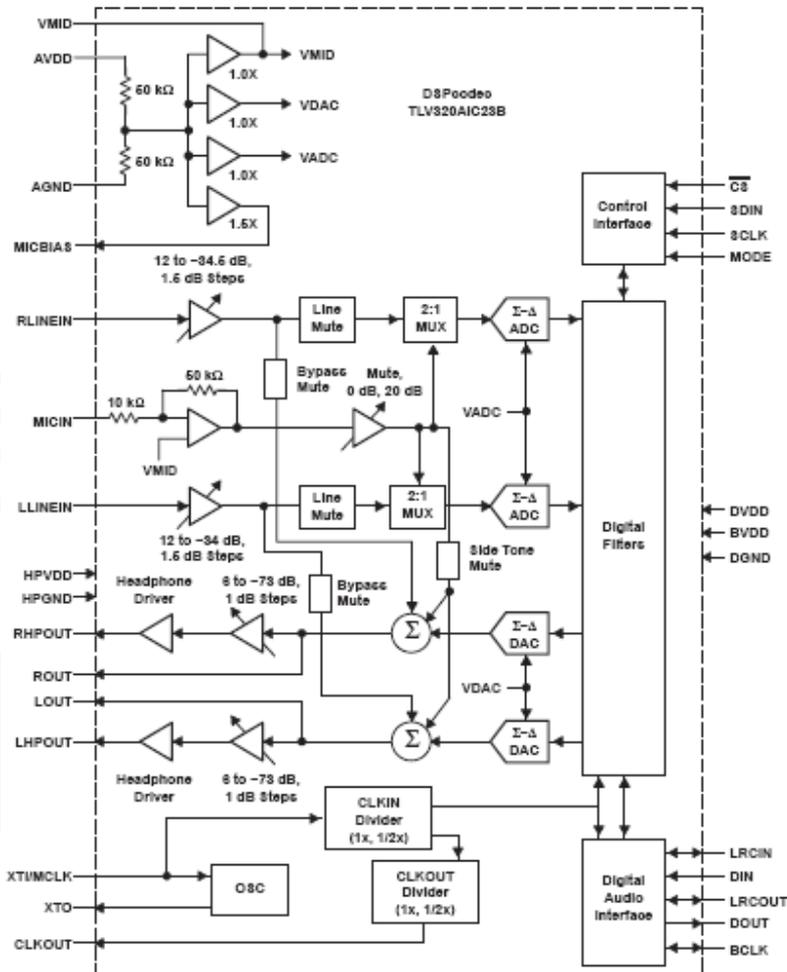


Figura 4.1 Diagrama de Bloques del Codec TLV320AIC23B

4.3.3. Otros Componentes

4.3.3.1. Selección de Cables

Para determinar el tipo de cable a usar, se optó por cables diseñados para audio. Se seleccionó el cable de 2X22 AWG 8451 fabricado por la empresa BELDEN. Dicho cable se utilizará para la conexión de micrófonos y auriculares con la tarjeta de desarrollo.

4.3.3.2. Selección de Micrófonos

Para la selección de micrófonos se tuvo como premisa el bajo costo de los mismos, con lo cual se optó por los micrófonos ELECTRET 9767 (Figura 4.2)

Sus características son las siguientes:

- Omni direccional
- Impedancia $\leq 2.2\text{KOhms}$
- Tipo Capacitivo
- Sensibilidad -32dB a -46dB
- Rango de frecuencia 20 a 20000Hz
- SNR de 60dB



Figura 4.2 Micrófono electret 9767

4.3.3.3. Selección de Pre-Amplificadores para micrófono

Para la amplificación de la señales de los micrófonos de error y referencia, se utilizará el amplificador operacional de audio OPA2134 (Figura 4.3).

Características del Amplificador:

- Baja distorsión (0.00008%)
- Bajo ruido ($8\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$)
- Entrada Fet, $I_B=5\text{pA}$
- Alta Velocidad
- Ancho de Banda de 8Mhz
- Ganancia de Lazo Abierto de 120dB
- Cuatro amplificadores operacionales

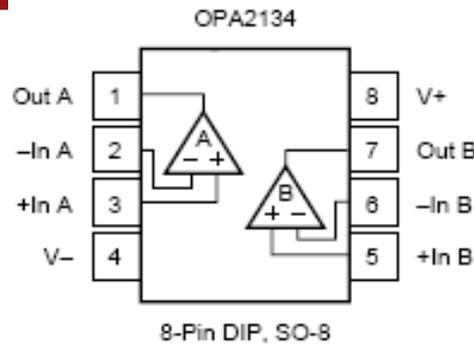


Figura 4.3 Amplificador Operacional OPA2134

4.3.3.4. Selección de auriculares

A) JVC MODELO HA-D525

Para el desarrollo de las simulaciones se trabajó con auriculares marca JVC modelo HA-D525, cuyas características dadas por el fabricante son:

- Respuesta en frecuencia 18 – 22000Hz
- 40mm de diámetro

Dado que el rango de interés en frecuencia para el proyecto era de 100Hz – 1.5KHz, se procedió a medir en el laboratorio de acústica de la Pontificia Universidad Católica la curva de respuesta frecuencias obteniéndose la grafica mostrada en la Figura 4.4:

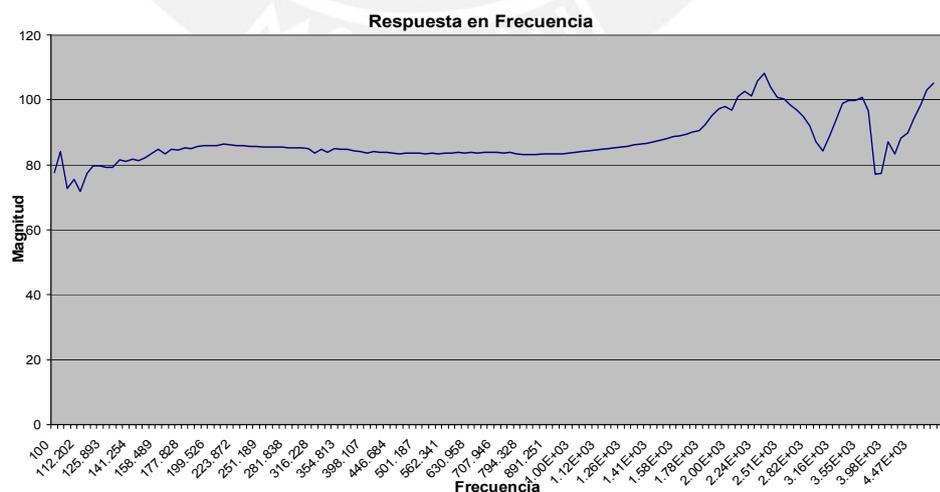


Figura 4.4 Curva de Respuesta en frecuencia de altavoz HA-D525

Puesto que el altavoz funcionará en el entorno de la cavidad auditiva, y debido a que la impedancia acústica dicha zona es distinta a la del aire; se procedió a realizar la medición utilizando como carga la cavidad auditiva de una persona.

Se observa que para las frecuencias requeridas el altavoz se comporta de un modo próximo al lineal, por lo tanto la elección de este satisface los requerimientos.

B) GF0401M

Al ser los altavoces usados en las simulaciones de costo elevado, se recomienda como alternativa de reemplazo el altavoz modelo GF0401M fabricado por la empresa **CUI Inc.** Las características del altavoz son las siguientes:

- Respuesta en frecuencia 136Hz – 2.8KHz
- Diámetro de 40mm
- Impedancia de 8Ohms

Se presenta en la Figura 4.5 la respuesta en frecuencia proporcionada por el fabricante y en la Figura 4.6 la gráfica del altavoz.

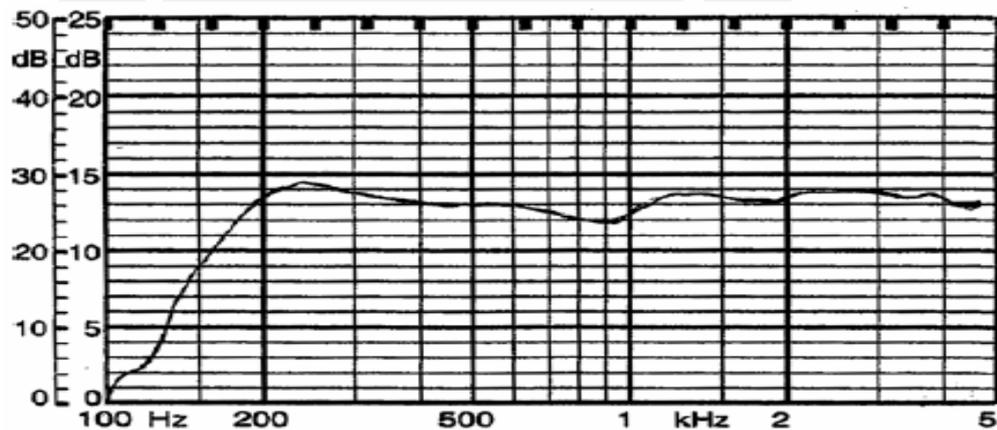


Figura 4.5 Respuesta en Frecuencia del GF0401M



Figura 4.6 Altavoz modelo GF0401M

4.3.4. Costo de Prototipo

El costo del prototipo se toma en base al costo de materiales y, el diseño y desarrollo en ingeniería.

CANTIDAD	UNID.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO (\$)	TOTAL (\$)
1		TMS320C5510 DSP Starter Kit (DSK)	395.01	395.01
1		OPA2134	1.34	1.34
3		ELECTRET 9767	0.3	0.9
2		GF0401M - SPEAKER 8 OHM 0.2W 40MM ROUND	3.1	6.2
6	MT	Cable de Audio Apant. 2X22AWG BELDEN 8451	0.8	4.8
3		Conector Stereo Jack hembra 3.5mm	0.3	0.9
1		ARSEG 9-080 tipo orejera	11	11
1		Estudio de Ingeniería	1000	1000
		TOTAL		1420.9

Tabla 4.2 Costo de Prototipo

4.4. Propuesta de Implementación para Producción en Serie

Si bien, para una propuesta completa de implementación deben considerarse factores como el diseño de pistas del circuito impreso, componentes adicionales relativos al procesador (capacitores, resistencias, etc.), o medios de grabación para el DSP, en este inciso se pretende proporcionar someramente una idea del costo del sistema propuesto si este fuese producido en serie.

4.4.1. Componentes Implicados en la Implementación

Tal como se ha hecho en el ítem 4.3, se usarán dispositivos de la empresa Texas Instruments; sin embargo en esta ocasión se seleccionarán y presupuestarán individualmente, en esta ocasión se escogió nuevamente un DSP y componentes de Texas Instruments por tener precios menores a otros fabricante (sobre todo el DSP) y también por la asesoría que brinda dicho fabricante en sistemas de control activo de ruido. Los componentes requeridos se describen en el Cuadro 4.3.

Componente	Descripción
TMS320VC5502-200	DSP : 32Kb RAM, 16Kb ROM, Tiempo de Ciclo 5ns, MMACS pico 400, Procesador de Punto Fijo, Interfase I2C
TLV320AIC23B	Códec de audio: Contiene amplificador para auriculares, Frecuencia de Muestreo máxima de 96Khz, Resolución de 24bits, Interfase de audio digital compatible con DSP, Interfase de control I2C, 3 entradas / 2 salidas.
OPA2134	Amplificador para acondicionamiento de señal de micrófono: cuenta con 2 amplificadores por integrado. Baja distorsión y ancho de banda de 8Mhz.
TPS72101	I/O supply: Ioutmáx = 150mA, protección térmica.
TPS62020	DSP core supply: Ioutmáx = 0.6mA, 95% de eficiencia.
TPS61070	Regulador de voltaje para códec: Ioutmáx = 0.15
ELECTRET 9767	Micrófono: capacitivo, omnidireccional
GF0401M	Speaker: 8ohm, 40mm de diámetro y potencia máxima de 0.2W.
Headset	ARSEG 9-080 tipo orejera
Stereo Jack hembra 3.5mm	Conector de audio para micrófonos y parlante.
Stereo Jack macho 3.5mm	Conector de audio para micrófonos y parlante.
Cable Belden 8427	7 conductores, AWG 20, alta conductividad.
PCB*	Tarjeta circuital impresa.

*Printed circuit board.

Tabla 4.3 Componentes para implementación

4.4.2. Costo de Implementación en Producción en Serie

Considerando que los componentes mencionados son los de mayor importancia en el sistema, es posible dar un estimado del costo del sistema real. Entendiéndose que la elaboración de este presupuesto es únicamente con fines comparativos y para tener una idea del costo aproximado del equipo si fuera producido en serie.

El cuadro 4.4 muestra el presupuesto a partir de 100 unidades.

CANTIDAD	UNID.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO (\$)	TOTAL (\$)
1		DSP TMS320C5502	9.044	9.044
1		Códec de Audio TLV320AIC23B	4.05	4.05
1		I/O Supply TPS72101	0.9	0.9
1		DSP Core Supply TPS62020	2.24	2.24
1		OPA2134	1.33875	1.33875
3		ELECTRET 9767	0.2	0.6
2		GF0401M - SPEAKER 8 OHM 0.2W 40MM ROUND	2.06580	4.1316
1.5	m	Cable de Audio BELDEN 8427	0.8	1.2
3		Conector Stereo Jack hembra 3.5mm	0.2	0.6
3		Conector Stereo Jack macho 3.5mm	0.2	0.6
1		ARSEG 9-080 tipo orejera	11	11
1		PCB - 7.6cmx12.7cm	15.1*	15.1
1		Ensamblaje **	23.69	23.69
1		Estudio de Ingeniería	10***	10
TOTAL				84.8
<p>* Precio de PCB de 6 capas a partir de 100 unidades asumiendo dimensiones máximas de 7.6cmx12.7cm. Valor cotizado en por la empresa 'PCB123' en su página web www.pcb123.com/pcb123pricing.php.</p> <p>** Precio de ensamblaje cotizado por la empresa 'Screamingcircuits' a partir de 100 unidades. Se consideran 4 componentes de montura superficial, 1 componente con socket y 7 de agujero pasante. Página web www.screamingcircuits.com/order/quote.aspx.</p> <p>*** Costo de Ingeniería de \$1000 dividido entre el número de artículos.</p>				

Tabla 4.4 Costo aproximado a partir de 100 unidades

4.5. Disposición del sistema implementado

Se recomienda como posible disposición final para sistema, la que se aprecia en la figura 4.7, así se brindará comodidad al operario para manejarse libremente.



Figura 4.7 Sistema de control activo de ruido

CONCLUSIONES

1. Para el caso del martillo neumático, el uso de una señal de referencia no acústica es más eficiente que una señal de referencia acústica.
2. El sistema es más rápido con una señal de referencia no acústica comparado con una señal acústica; la relación es de 10:4. Esto debido a poseer un factor de convergencia mayor.
3. *El sistema de protección auditiva con una señal de referencia no acústica (prueba 1a) atenúa el ruido del martillo neumático desde 3dB hasta 11.74dB en el 100% de los armónicos entre 100Hz y 630Hz (6to – 38vo armónico) y en más de 2dB en un 86% de los armónicos entre 630Hz y 1000Hz (39vo – 59vo armónico).*
4. El sistema de control activo de ruido propuesto es una solución viable al problema de ruido entre las frecuencias de 100Hz y 1000Hz.
5. Con la tecnología actual, todos los DSP observados se ajustan a los requerimientos del sistema, siendo el factor determinante para la compra las facilidades brindadas por el fabricante al elegir el producto y principalmente el precio.

RECOMENDACIONES

1. Dado que para la identificación del “Camino Secundario” debe emitirse ruido aleatorio por el altavoz estando una persona usando los protectores, resultando ello incomodo. Se recomienda el uso de alguna melodía musical en reemplazo del ruido, cuyo espectro en frecuencia sea similar al ruido aleatorio.
2. Se recomienda para futuros estudios, la toma de datos de un sensor no acústico real, y así comprobar cuan distante son los valores de atenuación con el sensor acústico usado.
3. Se recomienda el uso del sistema propuesto en complemento con técnicas pasivas de atenuación, debido a que lo propuesto es efectivo solo en frecuencias menores a 1000Hz.

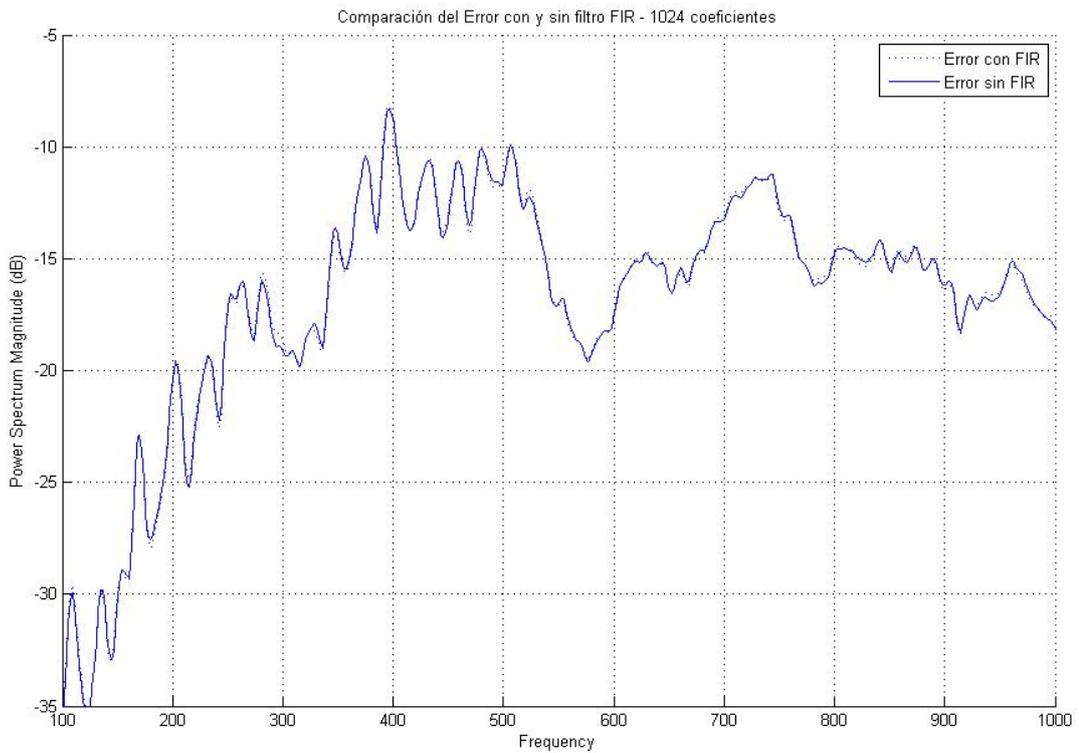
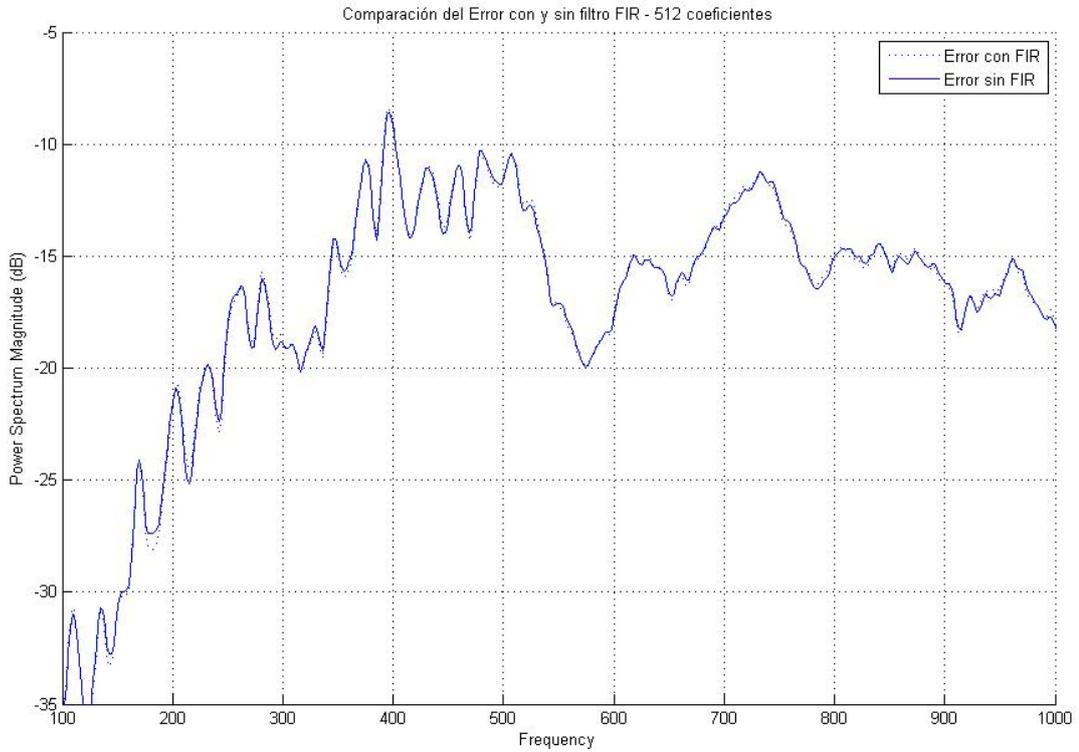
FUENTES

- [1] KUO, Sen y MORGAN D. R.
1999 Active Noise Control: A Tutorial Review. *Proceedings of the IEEE*, 87 (6): 943- 973.
- [2] ELLIOTT S.
1993 Active noise control. *IEEE Signal Process Magazine*, 10 (4): 12-35
- [3] KUO, Sen et al.
2005 Adaptive feedback active noise control headset: implementation, evaluation and its extensions. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 51 (3): 975- 982
- [4] ERIKSSON, L et al.
1988 Active noise control using adaptive digital signal processing. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, International Conference*, 5: 2594 – 2597.
- [5] COBO, Pedro et al.
2001 Control Activo del Ruido [En línea] Madrid: Instituto de Acústica. CSIC. [Consultado 2006/09/01]
< <http://www.ia.csic.es/Sea/publicaciones/4350ki035.pdf> >
- [6] HERNÁNDEZ, Carlos et al.
1997 Algoritmo adaptativo para la cancelación de ruido en conductos [En Línea] Valencia (España): Departamento de Comunicaciones, UPV. [Consultado 2006/09/01]
< <http://www.ia.csic.es/sea/publicaciones/4350ki013.pdf> >
- [7] COBO PARRA, Pedro
1999 Control Activo del Ruido de Baja Frecuencia en el Instituto de Acústica del CSIC. [En Línea] Madrid: Publicaciones TecniAcústica. [Consultado 2006/09/01]
< <http://www.ia.csic.es/Sea/publicaciones/4350ki017.pdf> >
- [8] MINUÉS, Antonio et al.
1999 Control Activo de Ruido en un Automóvil, [En Línea] Madrid: Publicaciones TecniAcústica. [Consultado 2006/09/01]
< <http://www.ia.csic.es/sea/publicaciones/4350ki029.pdf> >

- [9] DE DIEGO M et al.
1997 Control activo de ruido en un sistema de escape de automóviles [En Línea] Madrid: Publicaciones TecniAcústica. [Consultado 2006/09/01]
< <http://www.ia.csic.es/Sea/publicaciones/4350ki010.pdf> >
- [10] CUGUERÓ, M et al.
2005 Comparación de Algoritmos FeedForward Adaptativos para el Control Activo de Ruido en un Conducto [En Línea] Barcelona: TecniAcústica. [Consultado 2006/09/01]
< <http://www.ia.csic.es/sea/Terrassa05/RDO009.pdf> >
- [11] WIDROW, Bernard y STEARNS, Samuel D.
1985 Adaptive signal processing
Upper Saddle River
- [12] STEARS, Samuel D.
2003 Digital signal processing with examples in MATLAB
Boca Raton, Florida
- [13] VIKASH, Sethia
2002 Noise cancellation in headphones [En Línea]
[Consultado 2006/10/01]
<http://www.ee.iitb.ac.in/~esgroup/es_mtech02_sem/es02_sem_rep_vikash.pdf>
- [14] Organización Mundial de la Salud (OMS).
1999 Guidelines for Community Noise [En Línea]
[Consultado 2006/10/29]
<<http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html>>
- [15] Oficialía Mayor del Congreso
1993 Constitución Política del Perú [En Línea]
< <http://www.tc.gob.pe/legconperu/constitucion.html> >
- [16] Organización Mundial de la Salud (OMS).
1993 The Environmental Health Criteria Document on Community Noise. report on the Task Force Meeting
Duessldorf, Germany, 24-28
- [17] GARCÍA, Manuel
2004 Control activo de ruido de dos canales de banda angosta en ambientes basado en el DSP56303. Tesis (Ing.). Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima. 100 p.
- [18] KUO, Sen et al.
2006 Real - Time Digital Signal Processing. Segunda Edición. West Sussex [Inglaterra]. John Wiley & Sons Ltd.
- [19] CARNICER R, Eduardo.
1981 Aire Comprimido: Equipos y herramientas neumáticas. Barcelona [España]. Gustavo Pili S.A.

ANEXO N°1

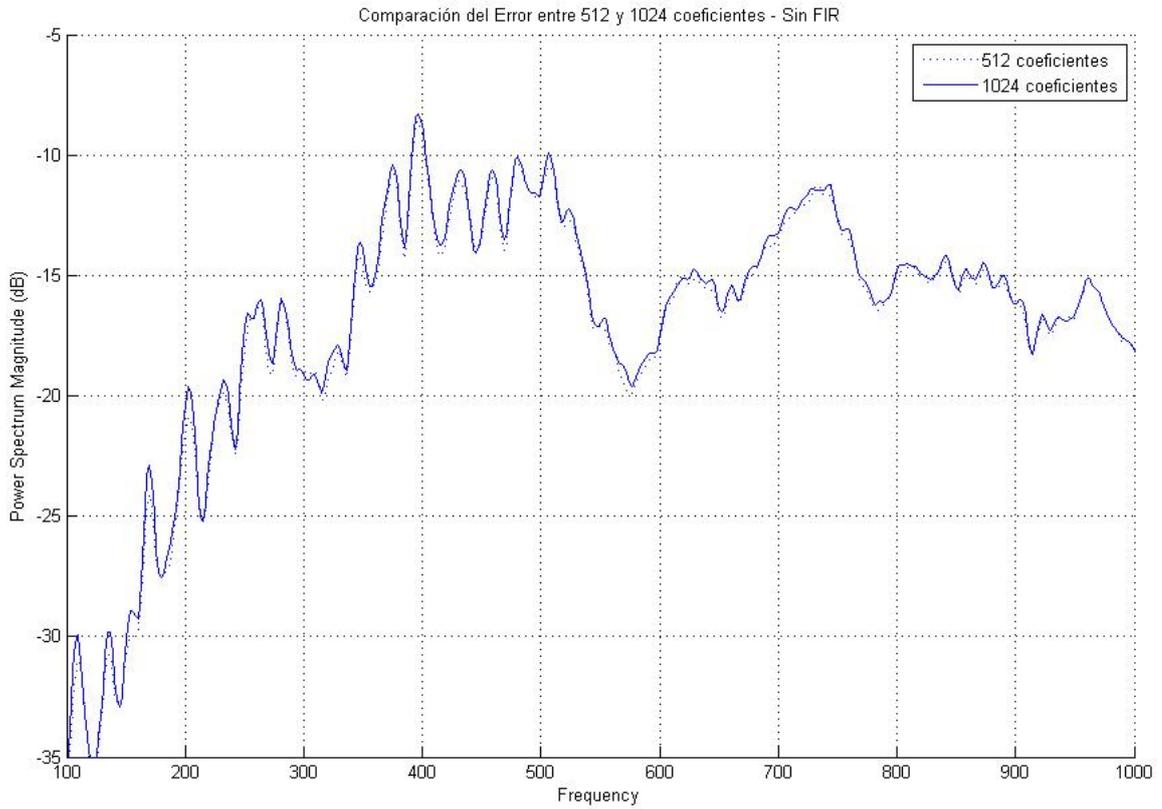
ERROR CON Y SIN FILTRO FIR – 512 Y 1024 COEFICIENTES



Factor de Convergencia (μ) = 0.1 en ambas gráficas

ANEXO N°2

ERROR CON 512 Y 1024 COEFICIENTES

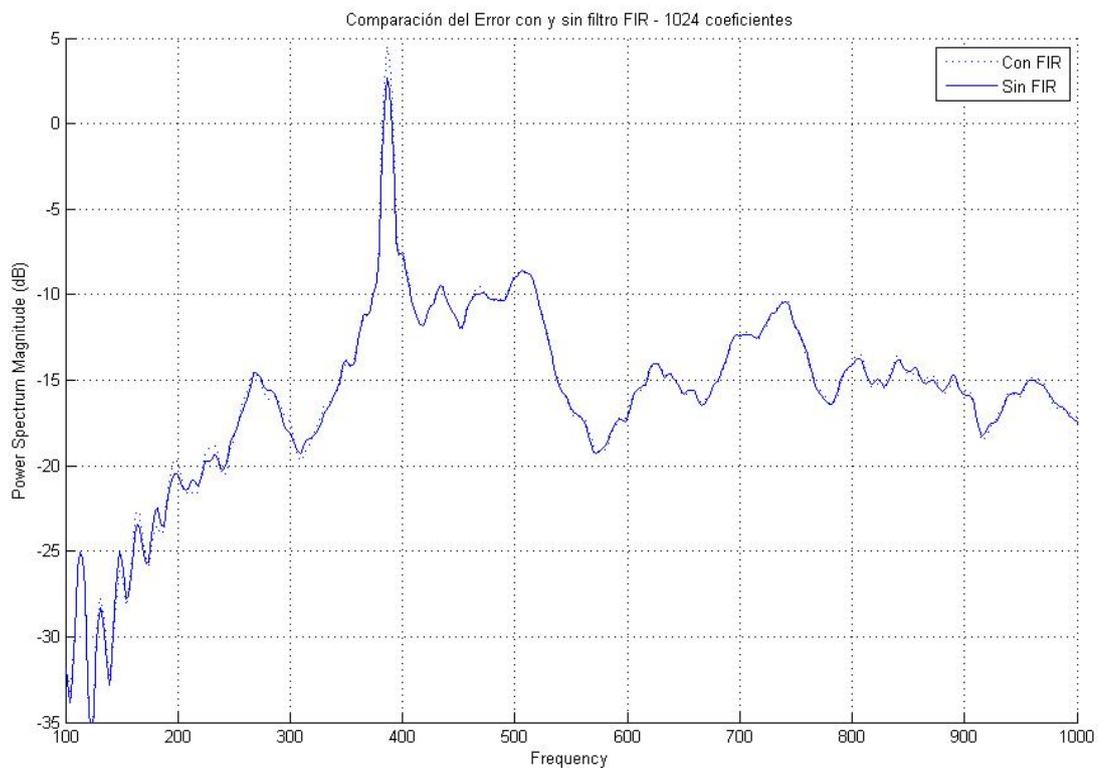
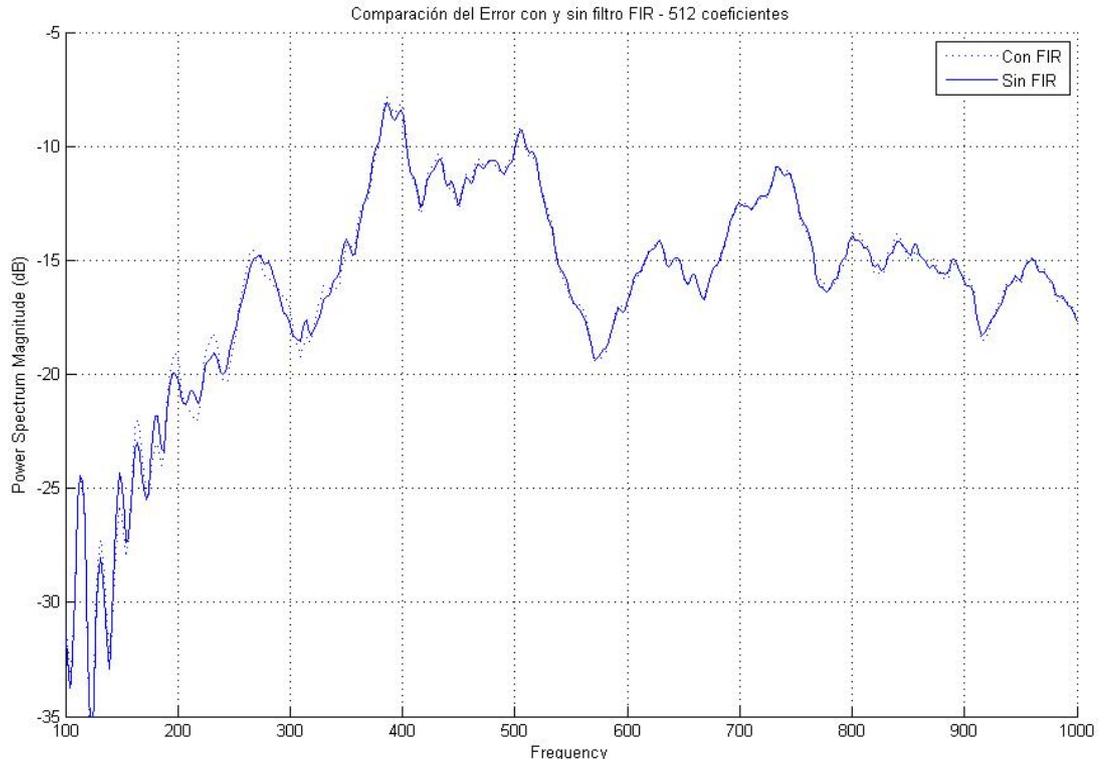


Factor de Convergencia (μ) = 0.1



ANEXO N°3

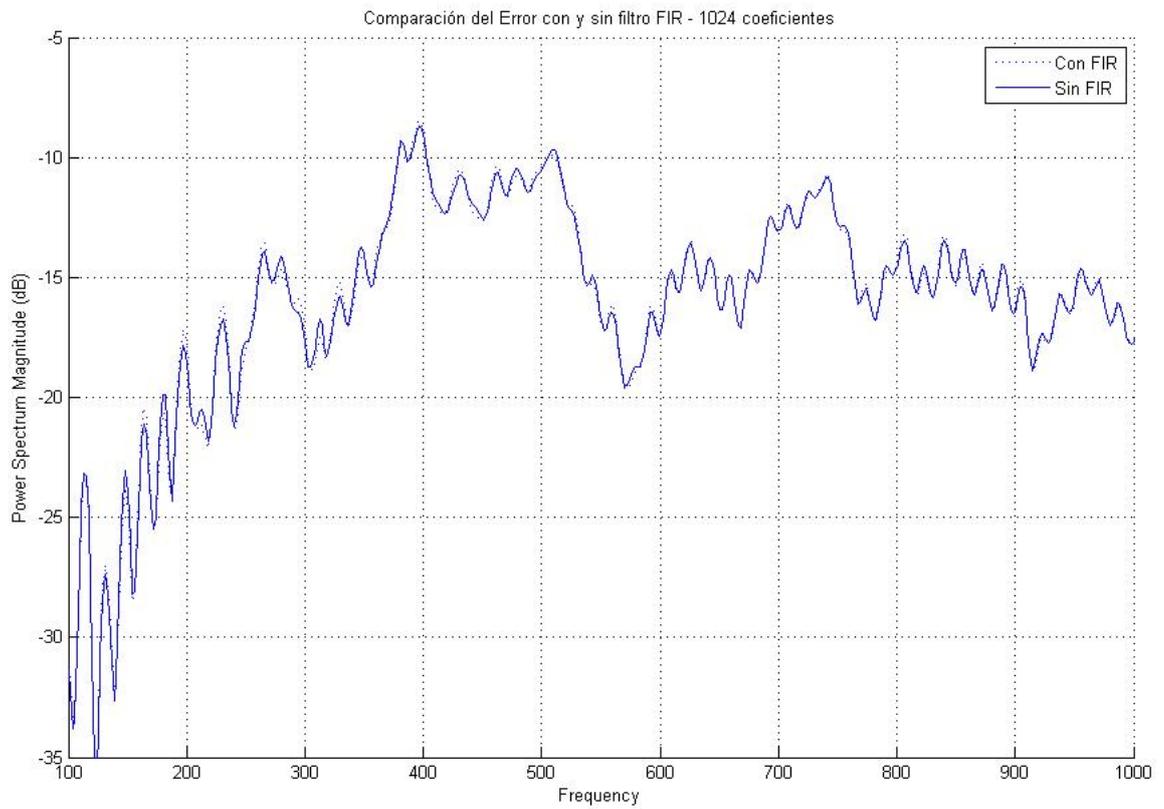
ERROR CON Y SIN FILTRO FIR – 512 Y 1024 COEFICIENTES



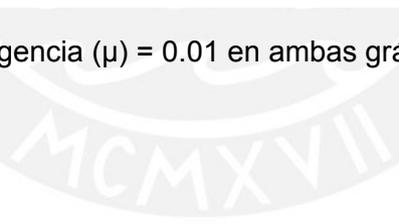
Factor de Convergencia (μ) = 0.04 en ambas gráficas

ANEXO N°4

ERROR CON 1024 COEFICIENTES REDUCIENDO μ



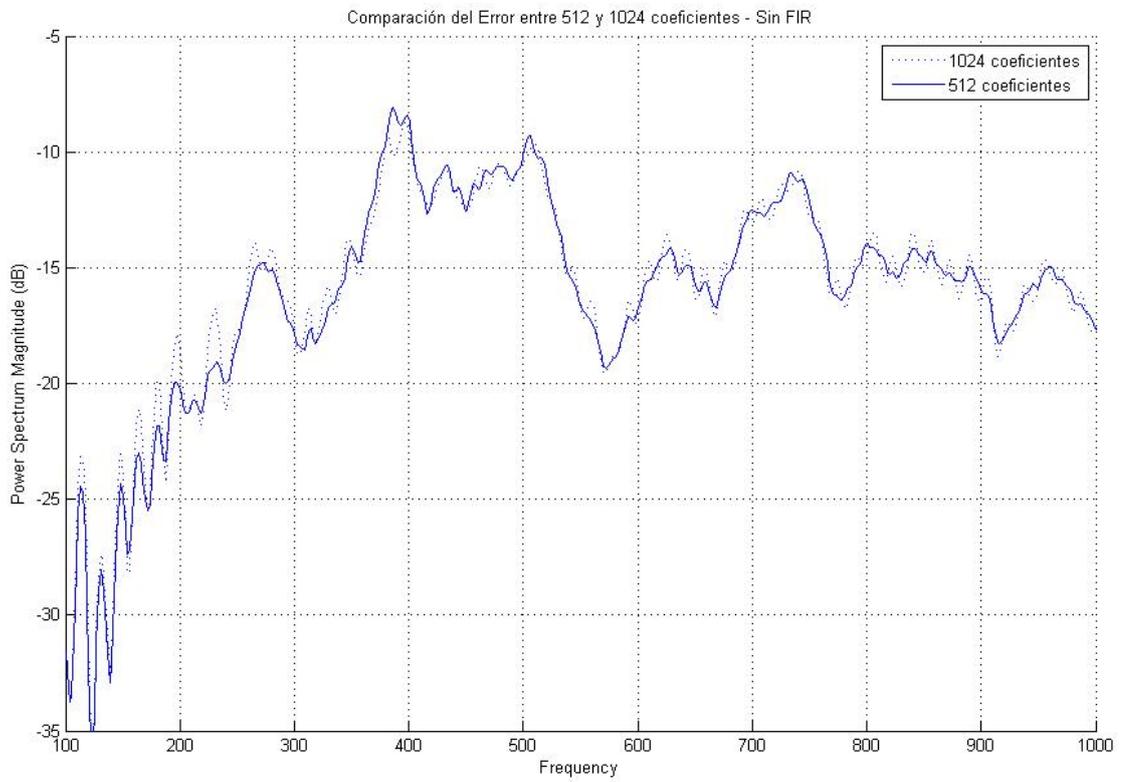
Factor de Convergencia (μ) = 0.01 en ambas gráficas



ANEXO N°5

ERROR CON Y SIN FILTRO FIR – 512 ($\mu = 0.04$) Y 1024 ($\mu = 0.01$)

COEFICIENTES



Factor de Convergencia (μ) = 0.04 con 512 coeficientes
 Factor de Convergencia (μ) = 0.01 con 1024 coeficientes

