



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTOR: CASTILLO MARCILLO, MIGUEL ÁNGEL

**TEMA: TRATAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOZ USANDO
FILTROS ADAPTATIVOS EN SUBBANDAS PARA AMBIENTES
ALTAMENTE RUIDOSOS**

DIRECTOR: ING. BERNAL, PAÚL

CODIRECTOR: ING. ALTAMIRANO, DANIEL

SANGOLQUÍ, JULIO 2014

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICADO

Ing. Paul Bernal

Ing. Daniel Altamirano

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado “Tratamiento de la Señal de Voz usando Filtros Adaptativos en subbandas para Ambientes Altamente Ruidosos”, realizado por el Sr. Tnte. Miguel Ángel Castillo Marcillo, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

Debido a que se trata de un trabajo de investigación recomiendan su publicación.

Sangolqui, 28 de julio de 2014

Ing. Paul Bernal
DIRECTOR

Ing. Daniel Altamirano
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

MIGUEL ANGEL CASTILLO MARCILLO

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “Tratamiento de la Señal de Voz usando Filtros Adaptativos en subbandas para Ambientes Altamente Ruidosos” ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolqui, 28 de julio de 2014

Tnte. Miguel Ángel Castillo Marcillo

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, Miguel Ángel Castillo Marcillo

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “Tratamiento de la Señal de Voz usando Filtros Adaptativos en subbandas para Ambientes Altamente Ruidosos”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolqui, 28 de julio de 2014

Tnte. Miguel Ángel Castillo Marcillo

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado para aquellas personas que estuvieron y confiaron en mí; A al ser divino que siempre ha escuchado mis oraciones, gracias a mi Dios, por ayudarme a culminar con éxitos una etapa más en mi vida profesional.

A mis padres, por su confianza y apoyo en cada momento de mi vida, a la distancia, siempre cuidaban de mí.

A mi hermana, que con su experiencia, ayudó a culminar esta meta.

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios, por bendecir a mis seres queridos, por darnos la salud, complemento para levantarnos con fuerzas y luchar cada día por nuestros sueños y anhelos; Por el Amor derramado a mi familia, que hace que siempre estemos unidos y comunicados a pesar de la distancia; Gracias, por darme la mano en esos momentos de decaimiento y enseñarme el valor de la perseverancia y la paciencia. Gracias por este logro, sin ti no podría culminarlo satisfactoriamente, solo te pido que siempre me acompañes en cada paso de mi vida.

Agradezco también a mi Padre, Madre y Hermana, a pesar de estar en otras ciudades, siempre cuidan de mí. Gracias por elevar sus bendiciones, por acompañarme en mis logros, por sus consejos sinceros que lo único que buscan es mi bienestar, gracias familia, siempre estaré orgulloso de ustedes.

A ti Priscila, por brindarme tu cariño y comprensión en cada momento, gracias por apoyarme en mis estudios, por sacrificar tu tiempo y esperar culminar mis estudios para estar juntos.

A la gloriosa Fuerza Aérea Ecuatoriana, por la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida. A ella, aportaré todos mis conocimientos aprendidos en la carrera a fin de liderar con integridad y justicia.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, por sus sabios y grandes enseñanzas, buscando la superación personal y profesional del alumno. A mis directores del proyecto, por su ayuda y cátedra incondicional, gracias por guiarme en la culminación del proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO	I
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	II
AUTORIZACIÓN	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICES DE TABLAS	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
GLOSARIO	XIV
CAPÍTULO 1	1
DESCRIPCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO	1
1.2 ALCANCE DEL PROYECTO	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 <i>General</i>	3
1.3.2 <i>Específicos</i>	3
CAPÍTULO 2	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 FUERZA AEREA ECUATORIANA EN AMBIENTES RUIDOSOS.....	5
2.1.1 <i>Ruido, seguridad y salud ocupacional</i>	5
2.1.2 <i>El ruido ocasionado por Aeronaves</i>	7
2.1.3 <i>Equipos para la Medición de Ruido</i>	8
2.1.4 <i>Problemática</i>	9
2.2 EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES Y FILTRADO ADAPTATIVO	10
2.2.1 <i>Introducción</i>	11
2.2.2 <i>Filtrado Adaptativo</i>	12
2.2.3 <i>Algoritmos Adaptativos</i>	13

2.2.4	<i>Aplicaciones</i>	14
2.2.5	<i>Mejoramiento de la señal</i>	15
2.3	FILTRADO ADAPTATIVO EN SUBBANDAS (SAF)	16
2.3.1	<i>Antecedentes</i>	16
2.3.2	<i>Configuración del Filtrado Adaptativo en subbandas</i>	17
2.3.3	<i>Estructura de Algoritmos en subbandas</i>	18
2.3.4	<i>Bancos de Filtros y Sistemas Multitasas</i>	20
2.3.5	<i>Alternativas de Solución del efecto Aliasing y Band-Edge</i>	22
2.3.6	<i>Análisis de desempeño SAF</i>	22
	CAPÍTULO 3	24
	DISEÑO DEL FILTRADO ADAPTATIVO EN SUBBANDAS	24
3.1	MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.2	EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE RUIDO	25
3.2.1	<i>Sonómetro</i>	26
3.2.2	<i>Procedimiento de Medición</i>	27
3.3	CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DE FILTROS	27
3.3.1	<i>Filtros FIR</i>	28
3.3.2	<i>Señal Aleatoria</i>	29
3.3.3	<i>Algoritmo LMS</i>	29
3.3.4	<i>Algoritmo NLMS</i>	32
3.3.5	<i>Algoritmo RLS</i>	34
3.4	ESTRUCTURA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SEÑAL	36
3.5	DISEÑO DE BANCOS DE FILTROS	39
3.5.1	<i>Bancos de Filtros de Análisis y Síntesis</i>	39
3.5.2	<i>Diezmadores e Interpoladores</i>	41
3.5.3	<i>Bancos de filtros en el Dominio de la Transformada</i>	43
3.6	DISEÑO DE FILTROS ADAPTATIVOS EN SUBBANDAS	43
3.6.1	<i>Estructura de lazo abierto</i>	44
3.6.2	<i>Estructura de lazo cerrado</i>	45
3.6.3	<i>Diseño y análisis del comportamiento SAF</i>	46
3.6.4	<i>Diseño de SAF para el mejoramiento de la voz mitigando el ruido</i>	51
	PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	55
4.1	INTRODUCCIÓN	55
4.2	TABULACIÓN DE LAS MEDICIONES DE CAMPO	55
4.3	ANÁLISIS DE LOS ALGORITMOS ADAPTATIVOS	56

4.3.1	<i>Algoritmo LMS</i>	56
4.3.2	<i>Algoritmo NLMS</i>	58
4.3.3	<i>Algoritmo RLS</i>	59
4.4	ANÁLISIS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SEÑAL.....	61
4.5	ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA SAF.....	66
4.5.1	<i>Propuesta</i>	70
CAPÍTULO 5		75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1. Sistema tradicional del DSP	12
Figura. 2. Estructura de un Filtro Adaptativo Típico	13
Figura. 3. Estructura de un Filtro Adaptativo en subbanda convencional	18
Figura. 4. Estructura de un Banco de filtros de N-canales.....	21
Figura. 5. Estructura de un Filtro FIR.....	29
Figura. 6. MSE del Algoritmo LMS con $\mu = 0.1$, $\mu = 0.05$ y $\mu = 0.025$	31
Figura. 7. MSE del Algoritmo LMS con $\mu = 0.001$, $\mu = 0.005$ y $\mu = 0.0025$	31
Figura. 8. MSE del Algoritmo NLMS con $\mu = 0.1$, $\mu = 0.05$ y $\mu = 0.025$	33
Figura. 9. MSE del Algoritmo NLMS con $\mu = 0.01$, $\mu = 0.005$ y $\mu = 0.0025$	34
Figura. 10. MSE del Algoritmo RLS con $\lambda = 0.98$, $\lambda = 0.75$ y $\lambda = 0.5$	36
Figura. 11. Estructura de mejoramiento de la señal.....	37
Figura. 12. Señal de voz original y derivada del algoritmo LMS y NLMS.....	38
Figura. 13. Cancelación de ruido con algoritmo LMS y NLMS.....	38
Figura. 14. Banco de filtros de Análisis; Banco de filtros de Síntesis.....	40
Figura. 15. Curva de MSE de SAF L=N y L<N con 4 bandas.....	41
Figura. 16. Tipos de solapamiento en los Bancos de Filtros.....	42
Figura. 17. Estructura de lazo cerrado de un Filtro Adaptativo en subbandas.....	45
Figura. 18. MSE de SAF con LMS y M=32.....	47
Figura. 19. MSE de SAF con NLMS y M=32.....	48
Figura. 20. MSE de SAF con LMS y M=128.....	49
Figura. 21. MSE de SAF con NLMS y M=128.....	49
Figura. 22. MSE de SAF con LMS y M=256.....	50
Figura. 23. MSE de SAF con NLMS y M=256.....	51
Figura. 24. Diagrama propuesto para la cancelación de ruido usando SAF.....	52
Figura. 25. Señal de voz y ruido de aeronave grabadas.....	53
Figura. 26. Señal de voz, señales del algoritmo LMS y NLMS al final de SAF.....	54
Figura. 27. MSE de los algoritmos LMS y NLMS usando SAF.....	54
Figura. 28. Medición de los niveles de ruido en las aeronaves.....	56
Figura. 29. Comparación del desajuste del Algoritmo LMS	57
Figura. 30. Comparación del desajuste del Algoritmo NLMS.....	58

Figura. 31. Comparación del desajuste del algoritmo RLS	59
Figura. 32. Algoritmos LMS, NLMS y RLS	60
Figura. 33. Filtrado de la señal de voz y ruido AWGN	62
Figura. 34. Filtrado de la señal de voz y ruido de aeronave.....	62
Figura. 35. Filtrado de la señal de voz nítida y ruido AWGN	63
Figura. 36. Filtrado de la señal de voz nítida y ruido de aeronave	63
Figura. 37. Filtrado de la señal de voz “letra A” y ruido AWGN.....	64
Figura. 38. Filtrado de la señal de voz “letra A” y ruido de aeronave.....	65
Figura. 39. Calificación de la señal de audio con diferente tamaño del filtro.....	66
Figura. 40. Comparación del desajuste de <i>SAF</i>	68
Figura. 41. Desajuste (dB) de cada N-Bandas	68
Figura. 42. Desajuste (dB) de cada N-Bandas	69
Figura. 43. Prueba de campo variando en número de subbandas con LMS	72
Figura. 44. Prueba de campo variando en número de subbandas con NLMS	72
Figura. 45. Medición cuantitativa del procesamiento <i>SAF</i>	73

ÍNDICES DE TABLAS

Tabla 1. Ámbito legal normado en el Ecuador referente al ruido	6
Tabla. 2. Aplicaciones del Filtrado Adaptativo	15
Tabla. 3. Relación entre el número de Bandas y el factor de decimación	40
Tabla. 4. Resumen de los Algoritmos analizados	60
Tabla. 5. Recomendaciones para la aplicación deseada.....	70
Tabla. 6. SNR del Cancelador de Ruido	71
Tabla. 7. Costo del proyecto	74

RESUMEN

El presente proyecto propone un sistema para el mejoramiento de la señal de voz, con el fin de disminuir el ruido durante el chequeo e inspección de una aeronave, dado que impide la correcta comunicación por radio entre los operadores y los pilotos. Para ello, se utiliza el algoritmo adaptativo en subbandas (*SAF*) y la herramienta MatLab® Versión 8, a fin de acelerar la velocidad de convergencia, reducir el costo computacional y para superar la desventaja de trabajar en todo el espectro de banda de la señal, especialmente en aplicaciones donde necesitan una mayor longitud del filtro como el habla. Este artículo describe el algoritmo adaptativo, la división de número de bandas, el tamaño del filtro adecuado y el error cuadrático mínimo para la aplicación. Los procesos de *SAF* analizados, son desarrollados haciendo referencia a trabajos realizados anteriormente por algunos autores, por tal motivo, se cita cada uno de las notaciones usadas, mismas que contribuyeron a obtener una simulación favorable para la aplicación descrita, todos los valores y resultados son analizados a fin de obtener las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

PALABRAS CLAVES: ALGORITMO ADAPTATIVO, AVIACIÓN, COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL, MATLAB®, RUIDO, COMUNICACIÓN POR RADIO, SAF, MEJORAMIENTO DE LA VOZ.

ABSTRACT

This project proposes a system for speech signal enhancement for reducing noise during aircraft inspection which impedes the correct radio communications between operators and pilots. An algorithm in subband (*SAF*) and MatLab® tool Version 8 is used to improve the convergence rate, reduce the computational complexity, and to overcome the disadvantage of a full band adaptive filtering, especially in applications where a longer filter length is required. This paper describes the adaptive algorithm, the number of bands, the appropriate filter size and the minimum square error for the application. The *SAF* analyzed, developed with reference to previous work by other authors, for that reason, cited each of the notations used, same that helped obtain a favorable simulation for the application described, all values and results are analyzed obtain the conclusions and recommendations of the project.

INDEX TERMS.- ADAPTIVE ALGORITHMS, AIRCRAFT, COMPUTATIONAL COMPLEXITY, MATLAB®, NOISE, RADIO COMMUNICATION, SAF, SPEECH ENHANCEMENT.

GLOSARIO

A

AEC	<i>Acoustic Echo Cancellation</i> - Cancelación del eco acústico
ANC	<i>Active Noise Control</i> - Control del ruido Activo
AP	<i>Affine Projection</i> - Proyección Afin.
AWGN	<i>Additive white Gaussian noise</i> – Ruido Gausiano Blanco Aditivo, es un modelo de ruido usado en varios procesos aleatorios por su similitud a los eventos que ocurren en el medio ambiente.
Alerones	Parte de una aeronave encargada de controlar el movimiento de balance en vuelo del avión,

C

Corrida de motores	Término usado en aviación para indicar el arranque del motor de una aeronave a fin de verificar flujo de combustible, presión del aceite, revolución del motor, presión, temperatura, fuego, entre otros.
--------------------	---

D

DB	<i>Decibelios</i> - Usado para expresar relaciones de radio de forma logarítmica
DBm	Es la relación de potencia de 1 <i>miliVatio</i> .
DBw	Es la relación de potencia de 1 Vatio.
Desajuste	Término usado para medir la diferencia entre la solución óptima de Wiener y el algoritmo usado
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> - Transformada de Fourier Discreta
Diezmador	Disminuye el número de muestras presentes en una señal.

F

FAE	Fuerza Aérea Ecuatoriana
FDAF	<i>Frequency-domain Adaptive Filter</i> - Filtrado Adaptativo en el dominio de la frecuencia
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> - Transformada rápida de Fourier
Filtro de Wiener	Utilizando métodos estadísticos, reduce el ruido presente en la señal de entrada de tal modo que la señal de salida del filtro se

aproxime lo más posible (en el sentido cuadrático medio) a una señal deseada (sin ruido).

- FIR** *Finite Impulse Response* - Respuesta finita al Impulso
- Frecuencia de Muestreo** Es el número de muestras por unidad de tiempo que se toma una señal continua para producir una señal discreta.
- Flaps** Partes de una aeronave usados durante el despegue o el aterrizaje. La misión de estos elementos es reducir la velocidad mínima que el avión necesita para despegar o aterrizar.

I

- IIR** *Infinite Impulse Response* - Respuesta infinita al impulso
- Infantes aéreos** Especialidad de la FAE para describir a un grupo de soldados especializados para cumplir misiones de rescate
- Interpolador** Aumenta el número de muestras presentes en una señal

L

- LMS** *Least Mean Square* - Mínimos Cuadrados Medio
- LS** *Least Squares*

M

- MSAF** *Multiband-Structured Subband Adaptive Filter* - filtrado adaptativo en subbandas con estructura multi-banda
- MSE** *Mean Square Error* - Error Cuadrático Medio

N

- NPA** Nivel de Presión Acústica
- NLMS** *Normalized Least Mean Square* – Normalizado Mínimos Cuadrados Medio

P

- PBFDAF** *Partitioned Block Frequency Domain Adaptive Filter*
- P-QMF** *Pseudo-Quadrature Mirror Filter*

Q

- QMF** *Quadrature Mirror Filter* - Filtro Espejo en Cuadratura

R

- Robustez** Término usado para determinar la capacidad que tiene un filtro

adaptativo para soportar las perturbaciones, en este caso el ruido.

RLS *Recursive Least Square* – Mínimos Cuadrados Recursivo

S

SAF *Subband Adaptive Filter* - Filtrado Adaptativo en subbandas.

Salud Usado en el proyecto para identificar el estado de bienestar físico, mental y social, no solo en ausencia de enfermedad.

Salud Ocupacional Disciplina que busca el bienestar físico, mental y social de los empleados en su sitio de trabajo.

Silos Lugar destinado para realizar el chequeo de las aeronaves o corrida de motores

SNR *Signal to noise ratio* – Relación Señal/Ruido, es la relación de potencia proporcional entre la señal deseada y el ruido que la corrompe

SOAF Self-Orthogonalizing Adaptive Filtering

SoundPro Sonómetro que permite medir los niveles de contaminación acústica y las frecuencias que la componen en el ambiente de trabajo.

Spoiler Parte de una aeronave usados durante el aterrizaje, una vez que el avión toca suelo con las ruedas se despliegan estos dispositivos que evitan que el avión vuelva al aire,

T

Teorema de Muestreo Operación básica para diseñar todos los sistemas de modulación de pulsos. La señal análoga se convierte en una secuencia de números que normalmente está espaciado en el tiempo.

U

Umbral Es la cantidad mínima de la señal que ha de estar presente para ser registrado por un sistema

V

Velocidad de convergencia Es el intervalo de tiempo necesario en situaciones estacionarias para que un filtro inicialmente desajustado, alcance su error cuadrático medio mínimo.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO

La Fuerza Aérea Ecuatoriana teniendo como misión “Desarrollar el poder militar aéreo para la consecución de los objetivos Institucionales que garanticen la defensa, contribuyan con la seguridad y el desarrollo de la nación”, cumplen con la tarea de seguridad y defensa encomendada con los aviones de combate y de transporte. Siendo máquinas hechas por el hombre, las aeronaves necesitan ser inspeccionadas continuamente por personal especializada en aeronáutica, cuya inspección y control de los aviones se realiza antes y después de cumplir con la misión de vuelo (Fuerza Aerea Ecuatoriana, 2010), (Muñoz). Dado que el chequeo involucra la verificación del estado del; motor, hélices, turboventiladores, turborreactores, entre otros (ETSI telecomunicacion, 2013); estos causan dificultad en la comunicación por radio entre el ingeniero de vuelo y el piloto debido a las altas fuentes de ruido, ocasionando errores involuntarios en el chequeo sincronizado del avión.

Bajo este contexto, la presente investigación, pretende encontrar un esquema para mejorar la calidad de la voz usando filtros adaptativos con estructura en sub-banda en un ambiente con fuentes de ruido altos, a fin de obtener una eficiente comunicación en línea de vuelo para el chequeo de las aeronaves, proyectando la investigación a la futura implementación en un *headset* para la comunicación con los operarios.

De igual forma, su importancia impulsa a la investigación, buscando una alternativa de solución e innovación que sea de gran ayuda para la sociedad que

trabaja en ambientes altamente ruidosos, donde la comunicación forma parte para la realización de un trabajo eficiente y seguro.

Trabajar con *SAF* (*Subband Adaptive Filtering* - filtrado adaptativo en subbandas), beneficia al tratamiento independiente de señales por las diferentes subbandas y la reducción de la carga computacional exigida por el proceso, mejorando: calidad, estabilidad, velocidad de convergencia y más. Comparar los filtros adaptativos implementados anteriormente con un filtro adaptativo diseñado para la minimización del ruido, permitirá obtener el mejor algoritmo que se adapte a la aplicación.

1.2 ALCANCE DEL PROYECTO

Partiendo de la revisión del estado del arte, en el presente proyecto se analizará el ambiente de trabajo perturbado por altas fuentes de ruido ocasionado por las turbinas de la aeronave en línea de vuelo, realizando mediciones de niveles de sonido con el equipo *SoundPro* existente en el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE (3M company, 2011).

Utilizando la herramienta de Matlab[®], se diseñará filtros adaptativos de bajo costo computacional y alta velocidad de convergencia, aplicando técnicas desarrolladas e investigadas para la cancelación de ecos acústicos como LMS (*Least Mean Square Algorithm* - Mínimos Cuadrados Medio), NLMS (*Normalized Least Mean Square*), entre otras, las cuales servirán para modelar a la aplicación en la cancelación de ruido generado en el ambiente a analizarse. Para el diseño de los filtros, se ingresará una señal de voz, a la cual se agregará la señal de ruido artificial de una aeronave con características medidas con el equipo *SoundPro* en el ambiente laboral.

En base a los resultados, se realizará las tabulaciones de cada una de las técnicas desarrolladas anteriormente con el fin seleccionar aquel que proporcione el mejor desempeño en la cancelación de ruido generado por las turbinas de la aeronave.

Se comparará los diferentes algoritmos aplicados con el fin de proponer y exponer un esquema de solución que beneficie la comunicación por radio entre el ingeniero de vuelo y el piloto cuando realizan el chequeo de la aeronave una vez encendida.

Se describirá las ventajas y desventajas de usar los filtros adaptativos con estructura en subbandas en la cancelación de ruido. Igualmente, se elaborará la memoria técnica, las conclusiones y recomendaciones a las que se llegue una vez finalizado el proyecto.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 General.

- Analizar el desempeño de los filtros adaptativos con estructura en subbanda utilizando la herramienta de Matlab® a fin de aplicarlo en ambientes altamente ruidosos.

1.3.2 Específicos.

- Desarrollar el marco conceptual y teórico de los filtros adaptativos con estructura en subbandas a fin de determinar su aplicación en la cancelación de ruido.
- Evaluar los niveles de ruido en tiempo real con el equipo *SoundPro*, a fin de analizar las potencias de ruido existentes en el ambiente laboral, mismas que permitirán determinar la relación señal ruido favorable para la implementación descrita.
- Diseñar los diferentes tipos de filtros adaptativos con estructura en subbandas, aplicando algoritmos estudiados e investigados para el mejoramiento de la señal de voz a fin de analizar su desempeño.

- Tabular los resultados obtenidos a fin de determinar el óptimo sistema que se adapte a la aplicación en la cancelación del ruido ocasionado por las turbinas de la aeronave.
- Comparar los resultados obtenidos en las diferentes estructuras de filtros adaptativos con el fin de proponer el óptimo sistema adaptado a la aplicación en la disminución de ruido.
- Concluir y recomendar el presente proyecto para mejorar la comunicación por radio ocasionado por el ruido de las aeronaves entre los operadores de vuelo, a fin optimizar el trabajo en línea de vuelo.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 FUERZA AEREA ECUATORIANA EN AMBIENTES RUIDOSOS

2.1.1 Ruido, seguridad y salud ocupacional

La OMS (Organización Mundial de la Salud) gestiona políticas de prevención e intervención de la salud a nivel Mundial, y cumple sus funciones, a tal manera de determinar tendencias sanitarias en beneficio de la humanidad (Organización Mundial de la Salud, 2013). En temas de salud, la OMS describe al ruido como un elemento dañino a la salud del hombre e interfiere con las actividades diarias que realizan las personas en el trabajo, en el hogar, en la universidad o en el tiempo libre. En exceso del ruido, perturba al hombre, causando daños cardiovasculares, reduce la concentración, aumenta el estrés y genera cambios en el comportamiento social. (Organización Mundial de la Salud, 2009).

Su objetivo principal, es la de reducir o minimizar todo accidente, enfermedades y trastornos que llegan a suceder en un ambiente de trabajo. Llámese a éste, a la actividad que realizan los trabajadores en beneficio de una Organización o Institución. Al reducir los riesgos en el trabajo, se garantiza eficiencia y seguridad en la actividad laboral especialmente en trabajos colectivos.

Existen muchas actividades donde se requiere la participación del hombre. Desde el surgimiento de los equipos industriales y motores, todo trabajo se volvió rápido y seguro, sin embargo, surgieron otros elementos perturbadores donde la persona se encuentra vulnerable a su efecto. Es por ello, que todo ser humano debe cuidarse de toda actividad, donde la contaminación sonora está presente.

Aspecto Legal

Tabla 1.

Ámbito legal normado en el Ecuador referente al ruido

FUENTE	DESCRIPCIÓN
CONSTITUCIÓN POLITICA DEL ECUADOR	Art.326 lit.5.- Toda persona tendrá derecho a desarrollar sus labores en un ambiente adecuado y propicio, que garantice su salud, integridad, seguridad, higiene y bienestar.
Reglamento General del Seguro de Riesgos del Trabajo (resolución 741, año 1990)	Accidentes en el trabajo y enfermedades profesionales que ocurran dentro o fuera de él, con ocasión o como consecuencia del mismo.
Instrumento andino de Seguridad y Salud en el trabajo (2005)	Uno de sus objetivos fundamental es procurar el mejoramiento en el nivel de vida de los habitantes de la Subregión con un trabajo decente, garantizando la seguridad y la salud en el trabajo.
Acuerdos ministeriales 219 y 220 (2012) del ministerio de Relaciones Laborales	Regula las competencias de los profesionales dedicados a la actividad de seguridad y salud ocupacional.
Plan nacional Para el buen Vivir (2009-2013)	Garantizar el trabajo estable, justo y digno en su diversidad de formas
Ley orgánica de Salud (Ley No. 2006-67)	Art. 113 Toda actividad laboral, productiva, industrial, comercial, recreativa y de diversión; así como las viviendas, otras instalaciones y medios de transporte, deben cumplir con lo dispuesto en las respectivas normas y reglamentos sobre prevención y control, a fin de evitar la contaminación por ruido, que afecte a la salud humana.
Ordenanza 213 del distrito metropolitano de Quito	Realizará los estudios e investigaciones necesarios para determinar: La planeación, los programas, reglamentos y las normas que deban ponerse en práctica para prevenir y controlar las causas de la contaminación originada por la emisión de ruido, señalando cuando proceda, zonas de restricción temporal o permanente.

Los riesgos ocupacionales más frecuentes del cual están expuestos los trabajadores son: Físicos, Químicos, Ergonómicos, Biológicos, Psicosociales y de Inseguridad.

El ruido como un factor de riesgo físico presente en la mayoría de los trabajos industriales y en aeropuertos, se ha definido como “Vibraciones transmitidos en el aire que pueden ser percibidos por el oído humano”. Estos sonidos, son descifrados como señales o simplemente ruido, la diferencia entre ellas, es que las señales transportan la información necesaria o útil para ser procesada; mientras que el ruido, porta la información que no requiere ser procesada pero que se encuentra presente dado que se mezcla con la señal.

Las consecuencias del ruido excesivo en la comunicación, es la incapacidad de comprender lo que el emisor desea transmitir. La OMS y ciertos Países a nivel Mundial, regulan los niveles de ruido que se encuentran en el ambiente, sin embargo, no se ha podido mitigar este problema, debido, al crecimiento de ciudades, tecnologías, aeropuertos, etc. En la Tabla 1, se indica los reglamentos, regulaciones y acuerdos ministeriales con lo referente al tema de seguridad y salud ocupacional en el Ecuador.

2.1.2 El ruido ocasionado por Aeronaves

El término ruido se ha definido como un elemento perturbador para el trabajo cotidiano de las personas expuestas al mismo, por lo que trabajar con mucha intensidad de ruido puede ocasionar dolor y daños físicos a la personas. Lograr el silencio en áreas expuestas al ruido, es una tarea difícil, por lo que disminuir su efecto, es el objetivo de toda organización. (Monroy, 2006)

Las actividades que se realizan en los hangares con las aeronaves, además de ser un trabajo sumamente peligroso, generan altas fuentes de ruidos, por lo que, la sincronización en el chequeo de una aeronave, cumple un rol importante, al igual que mantener la seguridad en el trabajo a fin de preservar la integridad de las personas

que trabajan en este ambiente. El chequeo de una aeronave en los silos o en los bancos de prueba, donde el arranque de motores se realiza en un 80% hasta el 100% dependiendo de la inspección, se debe realizar de una manera correcta, sin molestias y sin interferencias, a fin de evitar accidentes lamentables.

Por consiguiente, el objetivo del trabajo investigativo es mejorar la comunicación por radio que es perturbada por el ruido de la aeronave, entre los operadores de vuelo y el piloto durante el chequeo, a fin, de ayudar a cumplir con las tareas y actividades que se realizan en el entorno y que les permita tener una comunicación correcta entre ellos.

En el mercado Internacional, se puede encontrar varios equipos eficientes, probados y analizados para la cancelación de ruido en ambientes altamente perturbados por este fenómeno. Tal es el caso que el Ala de Transporte N° 22 ubicada en la ciudad de Guayaquil, adquirió en el año 2013, los equipos *TruLink*® (Transaeroinc, 2014), cuya uso está orientado a la búsqueda y rescate de personas sin perder la comunicación entre los pilotos, infantes aéreos, aeromédicos y miembros que conforman el equipo, con el equipo, se mantiene la comunicación full-duplex al salir de la aeronave, con una recepción de la voz clara y sin esfuerzo. El equipo también es usado para realizar el mantenimiento de los helicópteros.

BlueNAC 3000® (Nac Intercom, 2014), es un intercomunicador vía *Bluetooth*® usado en avionetas para la comunicación entre el piloto y copiloto a una distancia de hasta 30 metros, este dispositivo cancela el ruido y ecos entregando una voz clara. Y por último, los equipos *Pertor*, trabajan con un amplificador de micrófono para ajustar las señales de salida, también se puede ajustar el rango de frecuencias para obtener un buen reconocimiento de voz, con dos puntos de suspensión.

2.1.3 Equipos para la Medición de Ruido

Para las mediciones de los niveles de ruido en un ambiente de trabajo, se pueden utilizar los siguientes equipos:

- **Sonómetros.**- Son instrumentos que sirven para medir los niveles de presión sonora en un ambiente, su unidad en *Decibelio*. Existen varios tipos o clases de sonómetros bajo la Norma CEI 60651 y la norma CEI 60804, emitidas por la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional), del cual regula la fabricación de sonómetros. El Instrumento SoundPro SE/DL es un sonómetro capaz de analizar señales sonoras en escalas completas. Pueden efectuar un análisis de 1/1 Octava y 1/3 de octava dependiendo del tipo de filtrado Instalado (3M company, 2011).
- **Dosímetros.**- Instrumento para la evaluar el ruido fluctuante en ambientes de trabajos fijos y móviles.

Estos equipos antes de ser operados, deben ser calibrados a fin de mantener una medición real en el ambiente laboral.

2.1.4 Problemática

En aeronáutica, toda aeronave militar o comercial requiere ser chequeado antes y después del vuelo, este trabajo es realizado por personal capacitado, quién califica y declara la operatividad del avión a fin de evitar accidentes lamentables en vuelo. Durante este proceso realizado en tierra y una vez encendida, los operadores o técnicos verifican la comprobación de todos los sistemas.

El chequeo del avión o corridas de motores, es una trabajo colectivo, donde, los operadores verifican: flujo de combustible, revoluciones del motor, temperatura, luces, sistemas de alertas de falla, presión de combustible, presión de los gases de la turbina, vibraciones en el motor, vibraciones en la hélice, paso de la hélice, presurización de la aeronave, entre otros. Una vez realizado todo este proceso, el mecánico responsable de la aeronave, puede considerar al avión; disponible o reportarlo según sus fallas.

Todo este proceso de encender el avión, soportar las vibraciones y el ruido, provocan una desorientación en el trabajo, incomodando la realización de las tareas,

estando propensos a accidentes lamentables. Por lo que, mantener la comunicación constante durante todo el proceso con todos los operadores, es necesario para el chequeo y para la seguridad operacional.

El problema común que se presenta en el procesamiento del habla, es el efecto de interferencias que se encuentra presente en el medio de comunicación, este problema de interferencia, ocasiona ilegitimidad de la voz. El habla, es una capacidad básica de los seres humanos, la cual, es indispensable para la transmisión de la información en un rango de frecuencia audible de 20 Hz a 20 KHz y componentes de lenguaje significativo, solo hasta los 4 KHz.

Los instrumentos causantes del ruido durante el chequeo sincronizado del avión son:

- El ruido de los motores de las aeronaves divididos en tres tipos: Turboreactores, turboventiladores y hélices.
- La planta alterna cuya función es de brindar alimentación a la aeronave durante el encendido del mismo.

No consideramos otras fuentes de ruidos como en los alerones, spoiler, flaps por lo que estos son producidos en movimiento. Todas estas actividades son sumamente peligrosos, por lo que, mantener una comunicación eficiente entre todos los operadores es de vital importancia.

El ruido generado por las aeronaves es de tipo no lineal, por tanto, las mediciones de ruido se deberán realizar por periodos de tiempo, a fin de ser tratado como ruido continuo. Para el presente trabajo de investigación, se trabajará con el 80% de potencia de la aeronave, razón por la cual, los operadores realizan el mantenimiento en este rango.

2.2 EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES Y FILTRADO ADAPTATIVO

2.2.1 Introducción

La tecnología digital, ha formado parte en la vida de las personas, todo a su alrededor involucra al estudio del Procesamiento Digital, esto se debe, gracias al avance tecnológico que permite mejorar y facilitar el trabajo diario de las personas. El conocer y saber sobre el DSP (*Digital Signal Processor* – Procesamiento Digital de Señales) es de gran importancia.

La evolución del procesamiento digital de señales, ha originado que, actualmente se encuentre en el área de la medicina, en la investigación espacial, en arqueología, en biomedicina, en la televisión digital, en aviónica, en automotriz, electromecánica, mecatrónica, biotecnología, en aplicaciones militares, entre otras.

Los filtros digitales, básicamente pueden ser realizados de dos tipos: Respuesta al impulso finito (FIR) y respuestas al impulso Infinita (IIR), diferenciando el uno del otro, en su respuesta al impulso. Los trabajos realizados por muchos investigadores se han percibido hasta la actualidad, a tal forma de diseñar filtros FIR mediante mínimos cuadrados, a fin de acumular una respuesta de frecuencia multibanda óptima mediante la adición y sustracción secuencial de filtros pasabajos óptimos con bandas de transición (Zavala & Gonzalez, 1999).

Con el procesamiento digital, el investigador puede manipular, alterar, corregir, identificar y actualizar toda aplicación que requiera ser estudiada. Además, facilita el estudio para aplicaciones con frecuencias altas y en tiempo real. En materia militar, el DSP es empleado en la aviación, misiles, artillería, etc.

En la Figura 1, hace referencia a un sistema tradicional del procesamiento digital, donde, el filtrado como parte de operación del DSP, cumple con el objetivo de procesar y manipular la señal de entrada, a fin de extraer de ella, la información deseada.



Figura. 1. Sistema tradicional del DSP

No obstante, existe diferencia entre un filtro digital y un filtro adaptativo; los filtros digitales, tienen coeficientes invariantes en el tiempo, mientras que, los filtros adaptativos varía sus coeficientes de acuerdo al algoritmo implementado, convirtiéndose en un filtro digital con coeficientes adaptable. El simple hecho de no ser invariante en el tiempo, hace que su estudio sea más complejo, en consecuencia, por tener características que dependen de la señal de entrada, un filtro adaptativo es un filtro no lineal.

2.2.2 Filtrado Adaptativo

“Un filtro adaptativo es un dispositivo computacional que pretende modelar la relación entre dos señales en tiempo real de una manera interactiva”. Estos filtros son usados para crear algoritmos matemáticos mediante programación que pueden ser ingresados a un: DSP, FPGA (*field programmable gate array* - Arreglo de compuertas programables por el usuario) o VLSI (*Very large scale integration* - Integración en escala muy grande). Su implementación en un medio físico dependerá de la aplicación pretendida y de lo que se requiera.

La Figura 2, muestra la estructura de un filtro adaptativo, del cual, pueden derivarse otras estructuras. Está formado por dos bloques funcionales básicos: Un filtro digital para el filtrado deseado y un algoritmo adaptativo que ajusta los *weight* (o también llamados pesos) del filtro. El filtro digital calcula señal de salida $y(k)$ en respuesta a la señal de entrada $x(k)$, del cual genera una señal de error $e(k)$ mediante la diferencia entre la señal deseada o señal de referencia $d(k)$ y la señal de salida $y(k)$ (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009).

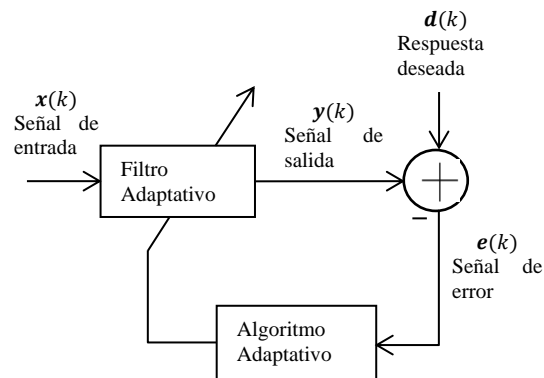


Figura. 2. Estructura de un Filtro Adaptativo Típico

Un criterio a tomar en cuenta es, la selección del sistema adaptativo, para ello, se debe tomar en cuenta: el tipo de aplicación a analizar y los parámetros de prestación de servicio como: la velocidad de convergencia, robustez, y los requerimiento para la implementación (requerimiento computacionales, estructura adaptativa y el algoritmo adaptativo). Varias aplicaciones son posibles usando filtros adaptativos, dichas aplicaciones pueden ser realizadas, usando diferentes estructuras, diferenciando una estructura de otra en la calidad de respuesta, costo computacional y el rendimiento.

2.2.3 Algoritmos Adaptativos

Los algoritmos Adaptativos son usados como procedimientos para ajustar los coeficientes del filtrado adaptativo (o también llamados pesos), a fin de mejorar la calidad de rendimiento del sistema. Se puede usar varios algoritmos para un mismo sistema; sin embargo, su desempeño dependerá del tipo de algoritmo y del sistema, en otras palabras, un algoritmo puede responder de manera eficiente para un sistema e ineficiente para otro (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009). En el libro (Haykin, 1991) y (Marques, 2002), para la elección del algoritmo, se debe tomar en cuenta: La velocidad de convergencia, la precisión, la complejidad numérica y la estabilidad de la estructura adaptativa.

La velocidad de convergencia, está definida como el número de interacciones necesarias para que el algoritmo, ante señales estacionarias, se aproxime lo suficiente

a la solución óptima de Wiener; Cuanto mayor la velocidad de convergencia, el algoritmo más rápidamente se adaptará a un ambiente estacionario de característica desconocida. La complejidad numérica; se refiere al número de operaciones que se deben efectuar para completar una interacción del algoritmo. Y, la estabilidad de la estructura adaptativa, dependerá del algoritmo de adaptación.

Los algoritmos adaptativos, se pueden dividir en dos clases:

- **Algoritmo de gradientes estocásticos.-** Está basado en el filtro de Wiener, cuya ventaja principal, es la reducción de la complejidad computacional, unos ejemplos de algoritmos de gradiente estocástico, son los filtros transversales LMS y los filtros en celosía GAL (*Gradient Adaptive Lattice*).
- **Algoritmo de mínimos cuadrados.-** Son basados en los filtros de Kalman, del cual, minimizan la suma de los cuadrados de los errores parciales. Una ventaja de estos algoritmos, es que tiene mayor velocidad de convergencia con respecto a los algoritmos de gradiente estocástico; sin embargo, presentan mayor exigencia computacional y problemas de estabilidad. Unos ejemplos de mínimos cuadrados son: Función de coste; Mínimos cuadrados ponderados, métodos bloque; LS (*Least Squares*) y métodos recursivos RLS (*Recursive Least Square – Mínimos Cuadrados Recursivo*).

2.2.4 Aplicaciones

La facilidad de trabajar en ambientes desconocidos y cambiantes es una ventaja de los filtros adaptativos. Los libros, clasifican al filtrado en cuatro categorías y son: La identificación de sistemas, identificación del sistema inverso, mejoramiento de la señal y predicción de la señal adaptativa. La Tabla 2 explica en forma general, cada una de las categorías.

Tabla. 2.

Aplicaciones del Filtrado Adaptativo

TIPOS DE APLICACIÓN	FUNCIONAMIENTO	APLICACIÓN
Identificación de sistemas	El sistema desconocido y el filtro adaptativo poseen la misma señal de entrada, la señal de referencia, es la salida del sistemas desconocido.	<ul style="list-style-type: none"> • Cancelación del eco acústico. • Control del ruido activo • Modelado de capas subterráneas.
Identificación de sistema inverso	La Señal original transmitida es distorsionada por el canal más el ruido ambiente como señal de entrada a un filtro adaptativo	<ul style="list-style-type: none"> • Ecuación de canal para un sistema de comunicación • Desconvolución predictiva. • Ecuación Adaptativa. • Ecuación Ciega.
Mejoramiento de la señal o Cancelación de Interferencia	La señal deseada es corrompida por el ruido, y a su vez, la señal de entrada es consistida por el ruido correlacionado.	<ul style="list-style-type: none"> • Cancelación del ruido Adaptativo. • Cancelación de interferencias • Formas de haz Adaptativas
Predicción	La señal deseada es una versión <i>forward</i> o <i>backward</i> con componentes predecibles de la señal de entrada del filtro adaptativo.	<ul style="list-style-type: none"> • Codificación predictiva lineal (LPC). • Codificación Diferencial Adaptativa (ADPCM) • Análisis espectral. • Detección de Señal.

Para el presente trabajo, el análisis será referente al mejoramiento de la señal, debido que, el objetivo del proyecto será la cancelación de ruido en ambientes altamente ruidosos.

2.2.5 Mejoramiento de la señal

El objetivo del mejoramiento de la señal es mitigar las señales indeseadas, que impiden que la señal original o deseada sea audible o entendible, comúnmente estas señales indeseables son conocidas como ruido o interferencia. El interés del presente

proyecto, está enfocado en la cancelación de ruido Adaptativo ilustrado en la Tabla 2, cuyo objetivo es mitigar el ruido usando filtros adaptativos con estructura en subbandas.

Como ilustra (Aholab, 2000), existen varios tipos de aplicaciones, donde la cancelación de ruido es requerido, una aplicación donde se desea mitigar el ruido es en los Electrocardiogramas (E.C.G.), debido que, se tiene una señal de ruido molesta de 50 Hz y además, existen señales que son cercanas a la señal del corazón. Otra aplicación es la cancelación de ruido en señales de voz, es muy usado cuando existen ambientes altamente ruidosos, cuyo objetivo es reducir el ruido presente en un ambiente, como por ejemplo, en los aviones militares donde la comunicación radio es indispensable.

2.3 FILTRADO ADAPTATIVO EN SUBBANDAS (SAF)

2.3.1 Antecedentes

Para el SAF, “La señal de entrada es descompuesta en múltiples canales paralelos, con la finalidad de facilitar el procesamiento de la señal de manera rápida y eficiente”. Los SAF, permiten acelerar la convergencia de los algoritmos a fin de minimizar el problema complejo del filtrado y a mejorar el funcionamiento de los esquemas de cada escenario a analizar. La idea de descomponer en cada subbanda y ser procesados con subfiltros de bajo orden (longitud más corta), es para disminuir la complejidad de trabajar en todo el ancho de banda, además, reduce términos de costo computacional y mejora la velocidad de convergencia en aplicaciones de DSP. (Azpigueta, 2011)

Recientemente, se proponen nuevas estructuras adaptativas en subbandas, de tal manera, que permitan reducir el MSE (*Mean Squared Error* - Error Cuadrático Medio) y acelerar la tasa de convergencia (Bulkool Batalheiro, 2009). Dichos estudios se basaron en nuevas técnicas para la identificación en tiempo real de larga respuesta impulsiva para la cancelación de eco acústico (Gilloire & Vetterli, 2009),

integrando algoritmos LMS en los sistemas de comunicación tanto en cancelación de ecos como en la ecualización. Luego, con la presencia de nuevos modelos estadísticos de algoritmos adaptativos en subbanda; describiendo el comportamiento del algoritmo Normalizado LMS (NLMS) con descomposición generalizada (GSD-NLMS) y Normalized *SAF* (NSAF), dan como alternativa de solución al algoritmo LMS. Todas las implementaciones de *SAF*, ayudan a disminuir el problema de la velocidad de convergencia; especialmente en aplicaciones como el control de ruido acústico y vibraciones, cancelación de eco acústico, ecualización de canales de comunicación y la reducción de ruido (Poonam, Harsim, & Nidhi, 2012) (Abid Noor, Abdul Samad, & Hussain, 2013).

Trabajos relacionados con el presente trabajo investigativo, demuestran que; el uso del filtraje adaptativo en subbandas, mejora la SNR (relación señal a ruido) a la salida de la señal de voz, mejora el tiempo de convergencia y reduce el MSE en estado estacionario cuando se aumenta el número de subbandas (Darlington & Campbell, 1996). En el artículo (Dornean, Topa, Kirei, & Neag, 2009) se realizó la cancelación del eco acústico, usando filtraje adaptativo en subbanda en Simulink® llegando a conclusiones similares descritas anteriormente.

Hoy en día, los filtros adaptativos con estructura en sub-bandas y Matlab® como herramienta para el DSP, abren campo al desarrollo de nuevos sistemas y algoritmos aportando a la innovación, investigación y el desarrollo.

2.3.2 Configuración del Filtrado Adaptativo en subbandas

El filtrado adaptativo en subbandas tiene como ventaja computacional; la eficiencia, ante aplicaciones que necesitan una mayor longitud del filtro, y la eficacia, si la señal de entrada es altamente correlacionada. En Figura 3, se presenta el diagrama de bloques de un filtrado adaptativo en subbandas convencional (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009). Toda estructura *SAF*, presentan una descomposición de la señal de entrada en N subbandas, dividiéndose en 3 bloques: El

bloque llamado de análisis o filtro diezmador, el bloque de subfiltros y el bloque de síntesis o filtro interpolador (Farhang-Boroujeny, 2013).

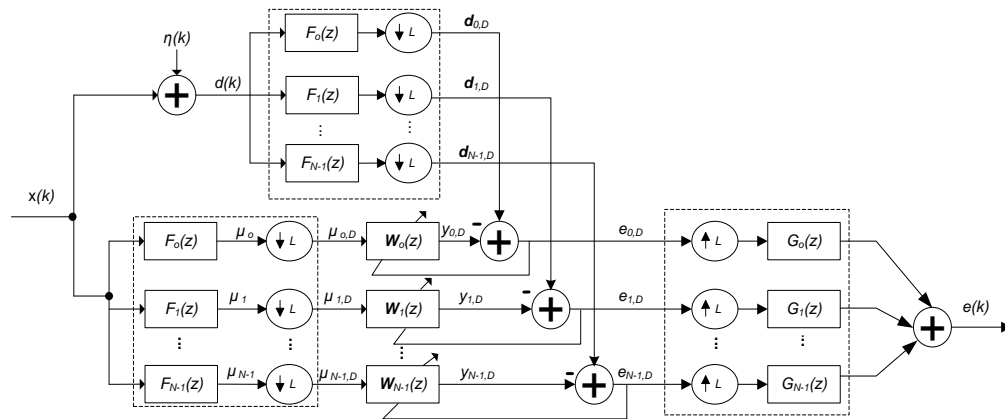


Figura. 3. Estructura de un Filtro Adaptativo en subbanda convencional

El bloque llamado de análisis o filtro diezmador, está formado por un banco de filtros que descomponen la señal de entrada $x(k)$ y la señal deseada $d(k)$ en N bandas espectrales denotados por $F_i(z), i = 0, 1, \dots, M - 1$, estas señales que fueron divididas en subbandas a una tasa más baja, son diezmadas por un factor L . Posteriormente, son procesados por el bloque de subfiltros adaptativos, que modifican el contenido armónico de la señal de cada subbanda $W_i(z)$ y minimiza la señal de error. Por último, el bloque de análisis, formado por un bloque de interpolación y por un banco de filtros de síntesis $G_i(z)$, permiten obtener la señal de error usando un factor de interpolación L , donde filtran todas las señales indeseadas del espectro de frecuencia que aparecieron en el proceso de diezmado e interpolado, para luego, reagrupar cada subbanda y formar una señal única a la salida del sistema. *SAF* puede ser clasificado en dos estructuras: estructura de lazo abierto y estructura de lazo cerrado.

2.3.3 Estructura de Algoritmos en subbandas

Gracias al estudio de grandes investigadores, se minimiza el problema complejo de los *SAF*, a continuación, se describen las estructuras estudiadas y relacionadas a la cancelación de ruido.

Algoritmo NSAF.- El algoritmo de filtraje adaptativo en subbandas normalizado NSAF (Lee & Gan, 2004), es una alternativa del algoritmo NLMS. Los coeficientes adaptativos trabajan en fullbandas, mientras que la señal en error $e(k)$, es dividida en N bandas. La ventaja de usar NSAF es aumentar su velocidad de convergencia, mientras que su respuesta computacional es lenta.

Estructura SAF Críticamente Muestreado y Sobremuestreado.- El orden del diezmado y el número de filtros, dependen de dos esquemas de bancos de filtros: Críticamente muestreados y Sobremuestreados. Se habla de banco de filtros críticamente muestreados, cuando el orden de diezmado es igual al número de filtros en subbandas, es decir $L=N$, donde se obtiene el mejor ahorro computacional con un cierto efecto aliasing, que disminuye el rendimiento de los SAF. Mientras que, los banco de filtros sobremuestreados se dá, cuando el factor diezmado es menor al número de filtros $L < N$ a fin de disminuir el efecto aliasing en cada subbanda.

SAF con Algoritmo Proyección a Fin (AP).- El algoritmo AP es una versión general del algoritmo NLMS, el AP aumenta la velocidad de convergencia del algoritmo NLMS usando un conjunto de AP. Varios trabajos fueron realizados bajo este esquema usando SAF críticamente muestreados y sobremuestreados (Chau, Sheikhzadeh , & Brennan, 2004), estos filtros necesitan bloques de análisis con mayor atenuación, para así, reducir el solapamiento entre las subbandas adyacentes, sin embargo, su implementación se vuelve compleja.

SAF con Variable de Tamaño de Paso.- Un método alternativo para incrementar la velocidad de convergencia del algoritmo adaptativo es aplicando diferentes tamaños de paso. Al aumentar el tamaño de paso, la velocidad de convergencia aumenta. Se ha usado satisfactoriamente en los filtros adaptativos de banda completa (Chau, Sheikhzadeh , & Brennan, 2004).

Filtros Adaptativos en subbandas sin retardo.- Durante todo el proceso de diezmado e interpolado que se realiza durante la descomposición de la señal de entrada $x(k)$ y la señal requerida o deseada $d(k)$ hasta su reestructuración; ocasiona

un retardo indeseable, en especial, cuando se trabaja en aplicaciones donde la voz está presente, debido a que necesita mayor longitud del filtro. Para este punto, se debe cumplir con estándares de telecomunicaciones en la transmisión (ITU-T, 1993). El problema del retardo de la señal, puede ser resuelto con la configuración de lazo abierto y lazo cerrado.

2.3.4 Bancos de Filtros y Sistemas Multitasas

Los bancos de filtros y los sistemas multitasas, son usados en *SAF* para diezmar e interpolar, cuya misión es, modificar el número de muestras presentes en una señal subyacente. Este proceso es usado, cuando en la señal existe un sobremuestreo, haciendo que aumente o disminuya la tasa de muestreo, sin perder la información que se encuentra en la señal.

El proceso de diezmo o también llamado de proceso compresión de la tasa de muestreo, disminuye la tasa de muestreo de la señal, mientras que el proceso de interpolación, aumenta la tasa de muestreo, a fin de reconstruir la señal a una tasa diferente. Las ecuaciones del proceso de decimación e interpolación, se describe a continuación.

$$x_D(m) = x(mL) \quad (2.1)$$

$$x_1(k) = \begin{cases} x(k/L) & k = 0, \pm L, \pm 2L, \pm 3L \dots \dots \\ 0, & \text{para cualquier otro } K \end{cases} \quad (2.2)$$

El proceso de diezmo e interpolado, está antecedido en su gran mayoría por un filtro digital, llamado filtro decimador e interpolador respectivamente. El filtro digital, por lo general es un filtro pasa-bajo, este filtro permitirá reducir el efecto *aliasing*, del cual, es causado por la reducción del muestreo en el proceso de diezmo, y el efecto *band-edge* causado por la expansión de la tasa de muestreo en el proceso de interpolación.

Bancos de filtros

El conjunto de filtros pasa-bajos, forman un banco de filtros con una entrada y salida común en el bloque de análisis y de síntesis respectivamente. El proceso de bancos de filtros en el bloque de análisis, permite descomponer en N bandas de frecuencias, y el bloque de síntesis, la reconstrucción de la señal.

La señal es dividida en N bandas uniformemente, donde, cada una de las subbandas, tienen por lo general, el mismo ancho de banda, del cual se puede diezmar en un factor de $1/N$ de tasa de muestreo, sin perder la señal de información original. En la Figura 4, se visualiza un banco de filtros en el bloque de análisis $F_i(z)$ y síntesis $G_i(z)$ en el dominio z , donde, el proceso de diezmado e interpolado se hacen presente. El orden de diezmado y el número de filtros, obedece a 3 esquemas: Cuando el factor de decimación es igual al número de subbandas $L=N$, se habla de un filtro máximamente decimado.

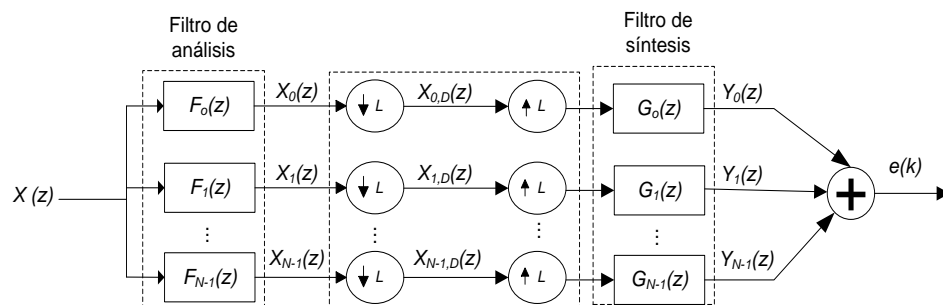


Figura. 4. Estructura de un Banco de filtros de N-canales

Si el factor de decimación es mayor al número de subbandas $L > N$, la pérdida de información debido al efecto *aliasing*, se verá reflejado al momento de reconstruir la señal de origen. Por el contrario, si el factor de decimación es menor al número de subbandas $L < N$, se dice que es un banco de filtro no máximamente decimado o sobremuestreado.

2.3.5 Alternativas de Solución del efecto *Aliasing* y *Band-Edge*

El efecto *aliasing* es generado por el proceso de diezmado que se realiza en el banco de análisis para la división de la señal de origen en cada subbanda, por tanto, forma una señal adicional transformada en ruido indeseable, ocasionando, el aumento del MSE a la salida de la señal reconstruida, a pesar de que (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009) indica que se puede cancelar colectivamente con el banco de filtros de síntesis con reconstrucción perfecta.

A fin de reducir el efecto *aliasing* generado en los sistemas subbandas; la estructura sobremuestreada $L < N$ anteriormente descrita, es usada para remplazar a la estructura críticamente muestreado $L = N$, su complejidad aumenta al trabajar con un factor de decimación mayor con pocas muestras. (Hansler & Schmidt, 2000). A continuación, se describirá las diferentes técnicas que se han desarrollado para reducir el efecto *aliasing*:

- Los filtros cruzados entre subbandas adyacentes, procesan la señal de entrada de subbandas adyacentes, para así, compensar los efectos de *aliasing* ocasionado por la decimación crítica.
- El desarrollo del algoritmo MSAF, del cual, el filtro adaptativo no es dividido en subfiltros, sino, las señales en subbandas, son usados para adaptar los pesos del filtro adaptativo completo.
- Por último, el uso de la estructura de lazo cerrado, del cual minimiza el MSE completo, en lugar de minimizar el MSE individual de cada subbanda.

2.3.6 Análisis de desempeño SAF

Estabilidad.

Se entiende que un sistema es estable, cuando la respuesta al impulso es absolutamente sumable. La estabilidad es probablemente la medida de comportamiento más importante para un sistema adaptativo. En la mayoría de los

casos la estabilidad está determinada por las condiciones iniciales, la función de transferencia del sistema, etc. Al momento que la estabilidad disminuye, la velocidad de convergencia aumenta, y viceversa, ocasionando que el sistema diverge, en lugar de converger a la solución.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL FILTRADO ADAPTATIVO EN SUBBANDAS

3.1 MATERIALES Y MÉTODOS

Para el trabajo de investigación y desarrollo, se realizó una serie de estudios previos, que permitieron coadyuvar y deducir el presente proyecto. Partiendo del estado del arte sobre la cancelación del ruido usando filtros adaptativos en subbandas para ambientes ruidosos, se seleccionó, el sistema que mejor se adapte a los requerimientos del presente trabajo a fin de cumplir con el objetivo general planteado.

Seleccionado los esquemas, se realizó las simulaciones usando la herramienta de Matlab®, que es un programa orientado al cálculo numérico y a la simulación, del cual, se ha constituido en una herramienta útil en el campo de la ingeniería, en la investigación, y en el interés del presente proyecto, en el DSP. Actualmente, para el procesamiento digital, Matlab® ofrece herramientas útiles para su diseño y entendimiento, software como *SPTool*, y *FDATool*, ayudan a minimizar el problema de diseño, sin embargo, estas no serían aplicadas en un entorno real, debido a que las aplicaciones son variables en el tiempo y en respuesta, y no obedecen a un comportamiento igual al diseñado.

El campo de aplicación es la cancelación de ruido en ambientes altamente ruidosos, del cual, una aeronave lo genera durante el chequeo del mismo por varios factores que la compone. Al mismo tiempo, sirve como una alternativa de solución

para otros campos como en ambientes industriales, *call center*, formula 1, etc.

Siendo un trabajo de investigación, evaluación y desarrollo tecnológico, la metodología que se usó en primer lugar fue el método de la medición, a fin de obtener información numérica de los niveles de ruido que producen los aviones anteriormente descritos, para luego, tabular los datos obtenidos y así referenciar a la aplicación real. De igual forma, se usó el método analítico, sintético y deductivo, del cual, permitió conocer las bases fundamentales de los filtros adaptativos con estructura en subbandas, a fin de obtener un sistema que se acople al trabajo propuesto. Por último, se realizó un test cualitativo y cuantitativo para identificar el grado de comprensión del audio luego de ser procesado con los *SAF*.

3.2 EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE RUIDO

Las mediciones de los niveles de ruido permitieron tener una visión al problema para así conocer los niveles de presión acústica presentes en el ambiente laboral y trabajar acorde a esos niveles de ruido, sus mediciones fueron realizadas identificando el tipo de propulsión (turboreactores, turboventiladores y hélices) de las aeronaves, por lo que las mediciones fueron variando de acuerdo a cada avión evaluado. Para la evaluación de los niveles de ruido, se tomaron en consideración 4 aeronaves:

- El avión *Avro*, propulsado por 2 motores turbohélice *Rolls-Royce RDa.7 Mk 536-2*, de fabricación Británica, es adquirido para el transporte de tropas, transporte logístico y de carga, tiene una longitud de 20,42 metros y una altura de 7,57 metros.
- El avión *C-130 Hércules* es una aeronave medio/pesado propulsada por 4 motores turbohélice de fabricación Americana, tiene una longitud de 29,8 metros y una altura de 11,6 metros, fue adquirido para el transporte de pasajero y de carga.
- El helicóptero *Dhruv* desarrollado por la compañía India *Hindustan Aeronautics Limited (HAL)* es propulsado por 2 turboejes, tiene una longitud

de 15,87 metros y una altura de 4,05 metros, fue adquirido para cumplir misiones de rescate, de transporte, de seguridad, ambulancia aérea, entre otros.

- El avión supersónico *Atlas Cheetah* fabricado por *Atlas Aircraft Corporation* de Sudáfrica, tiene una longitud de 15,7 metros con una altura de 4,6 metros. Avión caza monomotor (un turborreactor SNECMA ata 09K50) cumple misiones de seguridad y vigilancia aérea a nivel Nacional.

3.2.1 Sonómetro

El equipo utilizado para las mediciones de los niveles de contaminación acústica en los diferentes escenarios fue: el equipo *SoundPro SE/DL*, cuyas características permite analizar las señales sonoras en la escala completa (llamada también medición de banda ancha), se puede efectuar análisis de Bandas de Octava y Bandas de 1/3 de Octava.

Los datos obtenidos son presentados en cualquier momento de la operación, pudiendo programar, manipular, desplegar y grabar la medición realizada. Para la manipulación y el despliegue, el sonómetro posee un software de la empresa Quest llamado *QuestSuite Professional II (QSP II)*, mismo que permitió descargar los datos a un computador para su análisis y evaluación. Para una correcta medición, se tomó en cuenta ciertos parámetros iniciales que son recomendados al momento de usar el equipo *SoundPro*:

- Se recomienda realizar la calibración del equipo antes de iniciar con la medición, el equipo Q-20 permite efectuar la calibración rápida y precisa, su alineación fija permitirá obtener datos reales de calibración.
- El micrófono clase I apoya al estudio del presente trabajo investigativo.
- Los componentes del sonómetro como micrófono, preamplificador, pantalla de viento, baterías, memoria SD extraíble, deben estar funcionando e instalados correctamente a fin obtener mediciones lo más exactas posibles.

3.2.2 Procedimiento de Medición

Diversas formas de medición pueden ser efectuadas en una aeronave, todo dependerá del estudio requerido. Para el trabajo investigativo, del cual, propone una alternativa de solución para la comunicación por radio durante el mantenimiento de la aeronave y corridas de motores, las mediciones fueron realizadas:

- En el exterior del mismo, lo más cerca posible a la aeronave, y con el equipo lo más cerca al oído.
- Se identificó el entono a analizar a fin de evitar datos innecesarios de medición.
- Una vez realizadas las mediciones de ruido, se puede decir que se ha evaluado los niveles de ruido expuestos en un ambiente laboral.

Las características de cada aeronave son irregulares, debido que, el sonido varía de acuerdo al tipo de avión analizado, la intensidad del sonido es diferente de acuerdo a la distancia de medición, teniendo en cuenta que la intensidad del ruido de una aeronave es siempre mayor que otras fuentes de ruido.

Para el trabajo investigativo, las mediciones se realizaron durante el chequeo de la aeronave, los niveles de ruido de cada avión permitieron tener un entorno cercano a la realidad que viven los operadores durante el chequeo del mismo.

3.3 CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DE FILTROS

Para la elección del filtrado adaptativo, se realizó la revisión de los diferentes artículos técnicos y publicaciones en el área a analizar, con el propósito de encontrar y proponer la técnica que mejor se adapte al tratamiento de señales de voz en ambientes ruidosos, y así alcanzar el objetivo propuesto.

La configuración del filtrado adaptativo contempla los componentes: señal de entrada $\mathbf{x}(k)$, señal deseada $\mathbf{d}(k)$, señal de error $\mathbf{e}(k)$, señal de salida $\mathbf{y}(k)$, filtro

adaptativo y algoritmo adaptativo; cuyo objetivo en un sistema es, “hallar los coeficientes del filtro de salida $\mathbf{y}(k)$, dada una señal de entrada y una señal deseada. La señal de salida deberá parecerse lo más posible a la señal deseada $\mathbf{d}(k)$ ”. Se debe tener en cuenta que la señal de error, puede ser considerada la respuesta deseada al sistema, por ejemplo, en algunas aplicaciones como en ANC, la señal de error podría ser la salida deseada del sistema

3.3.1 Filtros FIR

El filtro adaptativo FIR, por brindar una mayor estabilidad que los filtros IIR y por su respuesta lineal en fase, son los más usados para la cancelación del ruido. El cálculo de la salida se lo realiza en forma lineal, es decir, dado un conjunto M de coeficientes llamados pesos, determinan el rendimiento del filtro, su ecuación es:

$$\mathbf{w}(k) = [w_0(k), w_1(k), \dots, w_{M-1}(k)]^T \quad (3.1)$$

El número de elementos de la ecuación 3.1, está relacionado con el orden del filtro FIR, la señal de entrada es definida como:

$$\mathbf{x}(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-M+1)]^T \quad (3.2)$$

Por lo tanto la señal de salida será:

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{w}^T(k)\mathbf{x}(k) \quad (3.3)$$

Y la discrepancia o error, está definida por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{d}(k) - \mathbf{y}(k)$$

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{d}(k) - \mathbf{w}^T(k)\mathbf{x}(k) \quad (3.4)$$

A partir de estas ecuaciones, se puede actualizar los coeficientes (o pesos) del filtro adaptativo en cada iteración, con el fin de, minimizar el error residual al usar los algoritmos adaptativos.

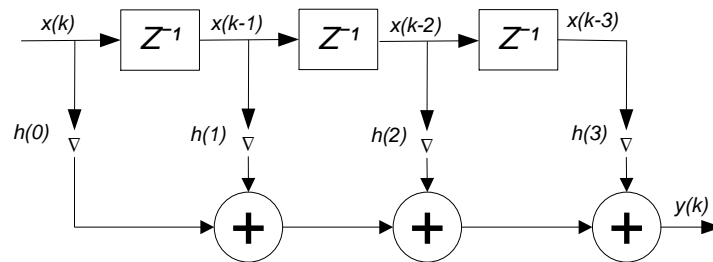


Figura. 5. Estructura de un Filtro FIR

3.3.2 Señal Aleatoria

Señal aleatoria o randómica, fueron usadas, debido que, muchas señales en aplicaciones reales son desconocidas. Por ejemplo, los valores de entrada de los sistemas de cancelación de ruido son en su mayoría desconocidos, por lo que es difícil predecir estos valores. Por tal motivo, las señales aleatorias, ayudan a crear estas señales.

3.3.3 Algoritmo LMS

El algoritmo LMS, conocido también como algoritmo basado en gradiente estocástico, debido a que usa el vector de gradiente, es comúnmente usado por su baja complejidad y robustez. Realiza dos procesos: el filtraje y la adaptación.

El proceso de filtraje, realiza el cálculo de la salida generada por un filtro discreto que por lo general es un filtro FIR, y una señal de error estimado, del cual proviene de la comparación de la señal de salida $y(k)$ y la señal deseada $d(k)$; Y el proceso de adaptación, automáticamente se ajustan los coeficientes del filtro o también llamados pesos de acuerdo a los cambios característicos en la señal de entrada $x(k)$.

Considerado por (Diniz, 2008), como uno de los algoritmos más usados por su baja complejidad computacional, prueba de convergencia en el entorno estacionario, convergencia despolarizada para la solución de Wiener, comportamiento estable cuando se implementa con la aritmética de precisión finita y fácil implementación; Sin embargo, su velocidad de convergencia depende de la dispersión de los autovalores de la matriz de correlación del vector de entrada, por tal razón, puede tener una respuesta lenta al sistema.

Al converger con la solución óptima de Wiener, los pesos del filtro adaptativo son actualizados de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\mathbf{w}(k + 1) = \mathbf{w}(k) + 2\mu\mathbf{e}(k)\mathbf{x}(k) \quad (3.5)$$

Donde $\mathbf{x}(k)$ es el vector de entrada de tiempo retardado, representado en la ecuación 3.2. Los coeficientes del filtro adaptativo o pesos en el tiempo k , se representan en la ecuación 3.1 de los filtros FIR.

μ de la ecuación 3.5, es un elemento conocido como parámetro de paso (de adaptación, o factor de convergencia), siendo éste, un número constante positivo durante todo el proceso. El valor μ está ligado al rendimiento, la velocidad de convergencia y la estabilidad del proceso adaptativo, siendo el único parámetro que permite ajustar el algoritmo a un rango determinado, en caso de no cumplir con este parámetro, simplemente diverge. Un μ largo, ocasionaría una convergencia rápida pero con una inestabilidad al sistema; un μ bajo con un tamaño del filtro M grande o señales fuertes, puede garantizar estabilidad en el proceso.

El diseño del algoritmo LMS, se realizó de acuerdo al siguiente orden:

- La salida del filtro FIR $\mathbf{y}(k)$, es calculado con la ecuación 3.3
- Los valores de estimación, son calculados con la ecuación 3.4
- Los coeficientes del filtro FIR son actualizados en cada iteración con la ecuación 3.5

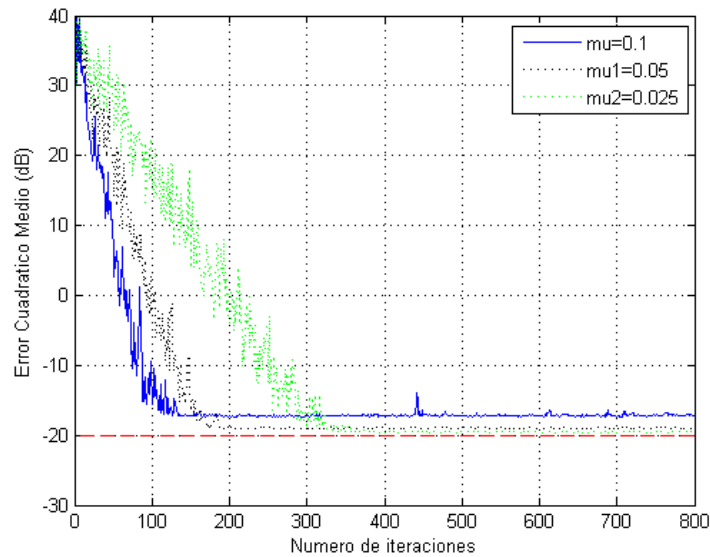


Figura. 6. MSE del Algoritmo LMS con $\mu=0.1$, $\mu=0.05$ y $\mu=0.025$

Del cual, se varió los valores de μ a fin de comprobar cuantas muestras necesita el sistema para poder converger satisfactoriamente. Se debe tener en cuenta que la señal de entrada debe estar relacionada con un sistema lineal (filtro FIR), generando así la señal deseada. La variación del factor μ correspondiente a la Figura 6 son: $\mu=0.1$, $\mu=0.05$ y $\mu=0.025$, y un ruido insertado de -20 dB a fin de comprobar la versatilidad y el desempeño del algoritmo. Se varió el ruido insertado (-40 y -80 dB) para así obtener el menor desajuste posible. La SNR fue de 20 dB. Los valores de μ de la Figura 7 son: $\mu=0.01$, $\mu=0.005$ y $\mu=0.0025$, con un ruido insertado de -20 dB.

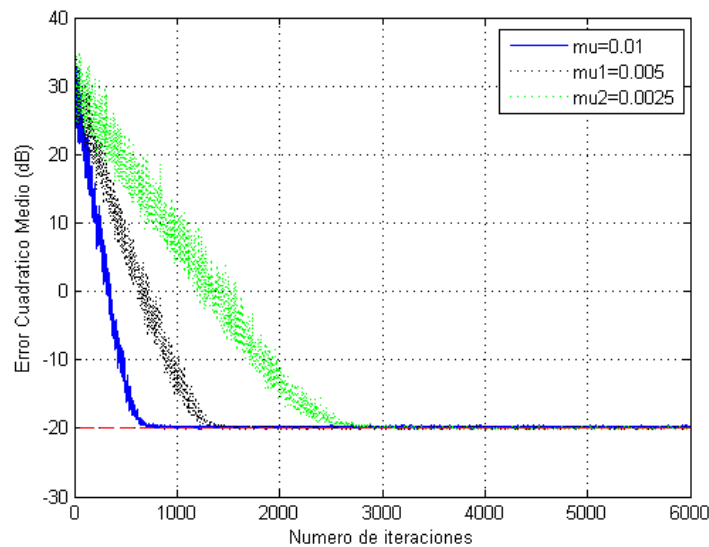


Figura. 7. MSE del Algoritmo LMS con $\mu=0.001$, $\mu=0.005$ y $\mu=0.0025$

El libro (Marques, 2002) recomienda, aumentar la velocidad de convergencia con un μ elevado a fin de obtener un error residual bajo; siempre y cuando, esto sea realizado al inicio del proceso de adaptación y lentamente ser disminuido. Para garantizar lo anteriormente descrito, debe estar en el siguiente rango.

$$0 < \mu < \frac{2}{MPu} \quad (3.6)$$

Donde, Pu es la potencia promedio de la señal de entrada $\mathbf{x}(k)$.

Un punto a tomar en cuenta de la tesis doctoral (Azpigueta, 2011) para aplicaciones acústicas es; la longitud del filtro adaptativo debe ser grande, por lo que, la ecuación 3.6 debe satisfacer a fin de asegurar una correcta convergencia. Un μ bajo, es óptimo para ser usado con el algoritmo LMS para señales acústicas.

De igual manera, se debe tomar en cuenta que el tamaño de adaptación μ es inversamente proporcional a Pu ; Sin embargo, dependerá del tipo de señal que se esté trabajando.

3.3.4 Algoritmo NLMS

A diferencia del algoritmo LMS, el algoritmo NLMS, evita el problema del tamaño de paso μ fijo, este proceso es realizado mediante la variación del algoritmo LMS, donde μ , es un valor proporcional a la inversa de la potencia total de los valores instantáneos esperados de los coeficientes del vector de la señal de entrada $\mathbf{x}(k)$, cuya ecuación a ser usada es:

$$\mathbf{w}(k + 1) = \mathbf{w}(k) + \mu \frac{1}{\mathbf{x}^T(k)\mathbf{x}(k)} \mathbf{e}(k)\mathbf{x}(k) \quad (3.7)$$

El algoritmo, permite acelerar la convergencia del MSE para la señal de entrada correlacionada. Al converger más rápido que el algoritmo LMS, garantiza el trabajo óptimo con señales no estacionarias, como el habla, tomando en consideración el

valor óptimo de μ . Al usar un factor de convergencia variable (u_n), su velocidad aumenta y no sufre el problema de amplificación ruido de gradiente que sufre el algoritmo LMS (Bulkool Batalheiro, 2009). El tamaño de adaptación está dado entre $0 < \mu < 2$.

NLMS ofrece mayor estabilidad ante señales desconocidas. Su aplicación es :

- La salida del filtro FIR $y(k)$, es calculado con la ecuación 3.3
- Los valores de estimación, son calculados con la ecuación 3.4
- El valor del tamaño de paso para el vector de entrada es:

$$\mu = \frac{1}{x^T(k)x(k)} \quad (3.8)$$

- Los pesos son actualizados en preparación para la siguiente iteración con la ecuación 3.7

Variando el tamaño de paso μ a fin de verificar el número de muestras necesarias para que el algoritmo converge, y teniendo en cuenta la relación de la señal de entrada con un sistema lineal (filtro FIR), se obtiene la Figura 8, cuyos valores de μ fueron: 0.1, 0.05 y 0.025. El ruido insertado a fin de comprobar la versatilidad del algoritmo fue de -20 dB.

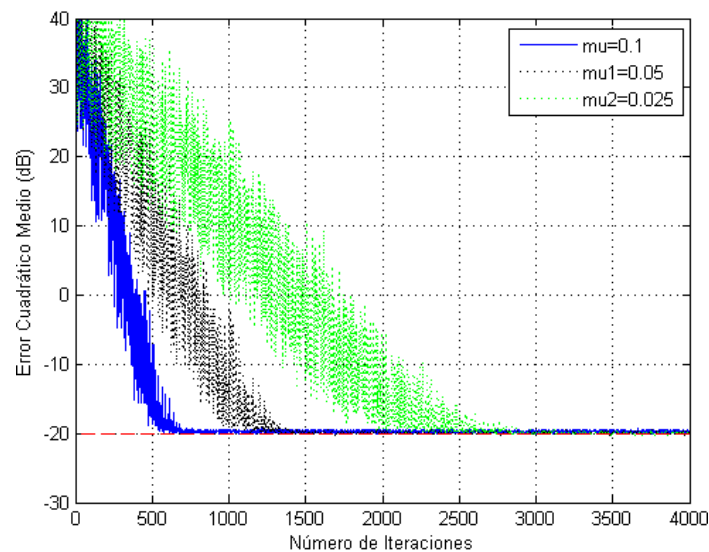


Figura. 8. MSE del Algoritmo NLMS con $\mu=0.1$, $\mu=0.05$ y $\mu=0.025$

Los valores de μ de la Figura 9 son: $\mu=0.01$, $\mu=0.005$ y $\mu=0.0025$, con un ruido insertado de -20 dB.

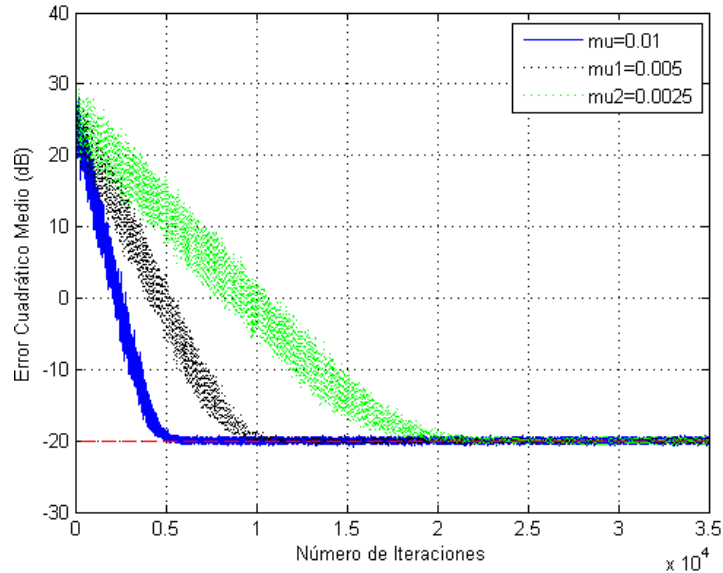


Figura. 9. MSE del Algoritmo NLMS con $\mu=0.01$, $\mu=0.005$ y $\mu=0.0025$

3.3.5 Algoritmo RLS

El algoritmo RLS, minimiza la función de coste o error cuadrático MSE, basado en el algoritmo de mínimos cuadrados LS. Una de las características del algoritmo, es que realiza una rápida convergencia, a pesar de que la propagación del valor propio de la matriz de correlación de la señal de entrada sea grande. En el artículo (Ardalan, 1986) manifiesta que, RLS trabaja eficientemente en entornos variables en el tiempo, sin embargo; su ventaja trae consigo, una alta complejidad computacional y una inestabilidad al sistema. La implementación del algoritmo RLS, se realizó de acuerdo al siguiente orden:

- La salida del filtro FIR $\mathbf{y}(k)$, es calculado con la ecuación 3.3
- Los valores de estimación, son calculados con la ecuación 3.4
- Los pesos son actualizados en preparación para la siguiente iteración, donde la ecuación de actualización del filtro RLS es:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mathbf{g}(k)\mathbf{e}(k) \quad (3.9)$$

La ecuación muestra que en un tiempo k , se requieren todos los valores anteriores; En la práctica, los valores del filtro FIR son constantes. La ganancia del vector está definido por:

$$\mathbf{g}(k) = \frac{\mathbf{r}(k)}{1 + \mathbf{x}^T(k)\mathbf{r}(k)} \quad (3.10)$$

Y $\mathbf{r}(k)$ está definida por:

$$\mathbf{r}(k) = \lambda^{-1}P(k-1)\mathbf{x}(k) \quad (3.11)$$

La matriz de correlación inversa $P(k) \equiv R^{-1}(k)$, puede ser calculado recursivamente como:

$$P(k) = \lambda^{-1}P(k-1) - \mathbf{g}(k)\mathbf{r}^T(k) \quad (3.12)$$

Remplazando la ecuación 3.11 en 3.10, se tiene:

$$\mathbf{g}(k) = \frac{\lambda^{-1}P(k-1)\mathbf{x}(k)}{1 + \lambda^{-1}\mathbf{x}^T(k)P(k-1)\mathbf{x}(k)} \quad (3.13)$$

Se debe tomar en cuenta, que el factor λ , presenta una cierta similitud al paso de adaptación μ en el algoritmo LMS, por tal motivo, se debe tomar en consideración: la velocidad de convergencia, desajuste final y capacidad de seguimiento del algoritmo.

Para la comprobación del comportamiento del algoritmo, se varió el valor de λ , en la Figura 10 los valores son: $\lambda=0.99$, $\lambda=0.75$ y $\lambda=0.5$.

Tanto el algoritmo LMS, NLMS y RLS, permitieron su estudio en la ciencia biomédica, donde, se logró la cancelación del ruido en las señales de electrocardiograma. Los resultados indicaron que un algoritmo puede ser más eficiente que el otro, dependiendo de las características del sistema a analizar. En

(Islam, Jidin , & Ali, 2009) se comprobó que, RLS permite el mejor rendimiento en la cancelación del ruido con un tiempo de convergencia alto, desafortunadamente este algoritmo tiene una alta complejidad computacional y problemas de estabilidad.

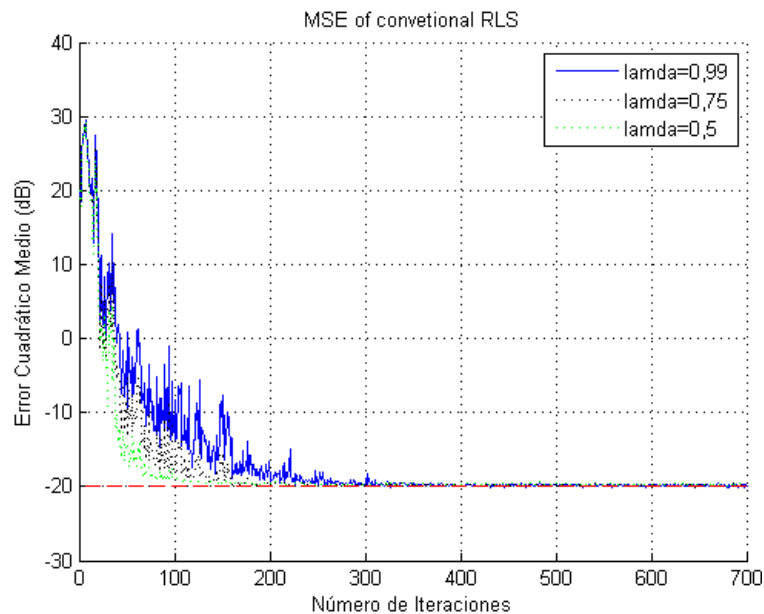


Figura. 10. MSE del Algoritmo RLS con $\lambda =0.98$, $\lambda =0.75$ y $\lambda =0.5$

3.4 ESTRUCTURA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SEÑAL

Posterior al estudio de cada algoritmo y de los niveles de ruido de aeronaves, en la Figura 11, se visualiza la estructura utilizada para el mejoramiento de la señal de audio, a fin de encontrar el óptimo paso de adaptación acorde a la aplicación deseada, el diseño de cada algoritmo permitió analizar el comportamiento general del algoritmo. El esquema consiste de dos canales, del cual, solo en el canal primario se encuentra la señal deseada $\mathbf{x}(k)$, misma que es corrompida por el ruido $\mathbf{n}(k)$. En el canal de referencia se encuentra la señal de entrada, del cual es el ruido mismo ruido $\mathbf{n}(k)$ correlacionado. Los pesos del filtrado adaptativo convergen a la función de transferencia diferencial resultando una señal de salida $\mathbf{y}(k)$ del cual es una estimación del ruido $\mathbf{n}(k)$ presente en la señal deseada. Por lo tanto, la señal de error $\mathbf{e}(k)$ se aproxima a la señal de voz $\mathbf{x}(k)$.

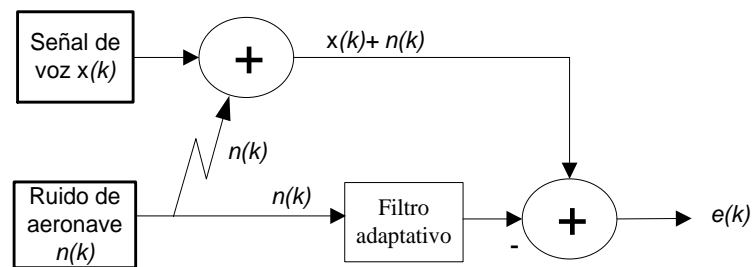


Figura. 11. Estructura de mejoramiento de la señal

Los algoritmos usados para la presente investigación fueron los algoritmos LMS y NLMS, mismos que fueron diseñados en la sección anterior. A pesar de que el algoritmo RLS es una excelente alternativa para mejorar la señal de audio, dado que, minimiza el error cuadrático medio presente a la salida del filtro, no fue tomada en el desarrollo de la simulación, debido a su comportamiento inestable, al alto costo computacional y a su complejidad de cálculo, en comparación a los dos algoritmos usados, perjudicando al desempeño del sistema, sin embargo, como se manifestó anteriormente, el campo del DSP es muy amplio y abre estudio para muchos investigadores y muchas formas de solucionar un mismo problema (Benavides Aspiazu, Calienes Bartra, & Silva Cárdenas, 2009). Tomando en consideración las recomendaciones de algunos autores referente a la convergencia del algoritmo y a la disminución del MSE, se resume que; los parámetros para mejorar la convergencia, el número de bandas a dividir, el tamaño del filtro, el solapamiento de cada banda y el estudio de estos algoritmos, quedan a menester del investigador.

El estudio para la cancelación de ruido fue realizado con tres archivos de voz (.wav), con una frecuencia de muestreo de 8 KHz, donde cada uno de las señales, fueron corrompidas por dos señales ruidosas; El AWGN (*Additive white Gaussian noise* - ruido gaussiano blanco aditivo) con SNR (*Signal-to-noise ratio* - relación señal a ruido) acorde a las mediciones de campo realizadas en las aeronaves militares, y un ruido generado por las aeronaves. El ruido de aeronave usado fue similar a la de un avión de transporte C-130 adquirido para la simulación, para garantizar una ganancia mínima del sistema, se atenuó la señal de voz aumentando el ruido AWGN y el ruido de aeronave, llegando a un SNR igual a -40 dB.

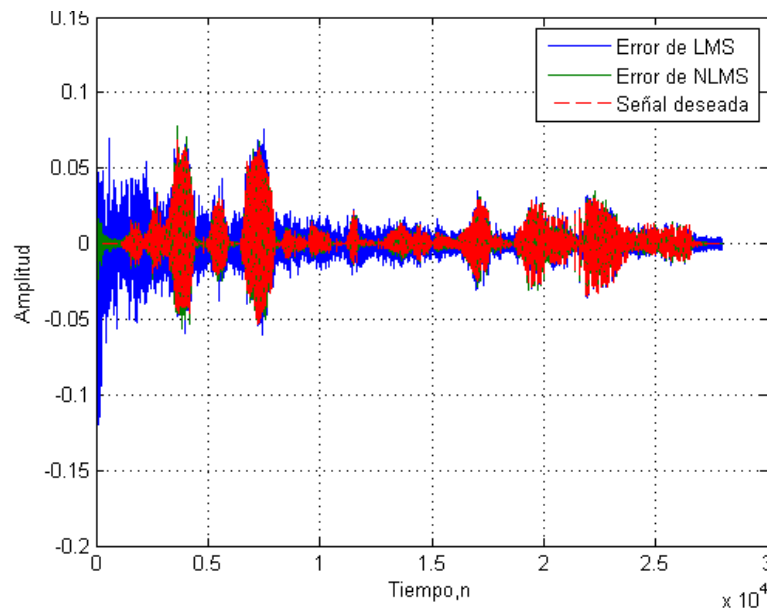


Figura. 12. Señal de voz original y derivada del algoritmo LMS y NLMS

Las señales de voz y de ruido fueron procesadas variando el tamaño de paso u y con un tamaño del filtro fijo, a tal manera, de obtener el tamaño de paso óptimo para la cancelación de ruido durante la comunicación por radio. En la Figura 12, se visualiza el error del algoritmo LMS y NLMS después de la cancelación de ruido de acuerdo a la estructura del mejoramiento de la señal. En el siguiente capítulo se mostrará los resultados obtenidos en cada simulación.

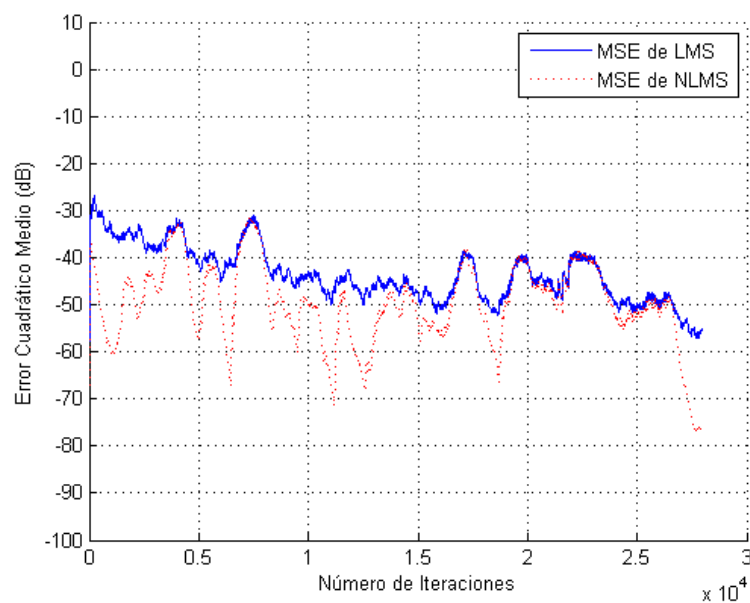


Figura. 13. Cancelación de ruido con algoritmo LMS y NLMS

En la Figura 13, se observa la estabilidad y el comportamiento del algoritmo LMS y NLMS, resultando a la salida del sistema un audio distorsionado por el ruido pero audible y entendible.

3.5 DISEÑO DE BANCOS DE FILTROS

Los bancos de filtros, parte importante para el diseño de *SAF*, son formados por el conjunto de filtros que por lo general son filtros pasa bajos, del cual, se componen de dos partes: filtros de análisis y de síntesis. Esto permitirá la manipulación de la información en cada subbanda.

3.5.1 Bancos de Filtros de Análisis y Síntesis

Se diseñaron los bancos de filtros necesarios para la cancelación de ruido con estructura en subbandas. Los bancos de filtros de análisis de la Figura 14 (a) permitieron descomponer la señal $x(k)$ en N-bandas, a tal manera de que el conjunto dividido abarque todo el espectro de la señal de entrada. La ventaja de los bancos de filtros, es de permitir la manipulación de la información que se tiene en cada subbanda; al no trabajar con la banda completa, se facilita la operación de la señal, reduciendo errores en el procesamiento de la misma. La descomposición de la señal se la puede dividir de tal manera que cada una de las bandas de frecuencia, tienen el mismo ancho de banda (banco de filtros uniforme).

Los bancos de filtros de síntesis de la Figura 14 (b), permitieron reconstruir la señal dividida en N-bandas en una señal única a la salida. Los bancos de filtros pueden ser usados en varias aplicaciones: filtraje adaptativo en subbandas, separación de la señal en N-bandas, analizadores de espectro, sistemas telefónicos privados, compresión de señales, implementación de transmultiplexores, entre otros.

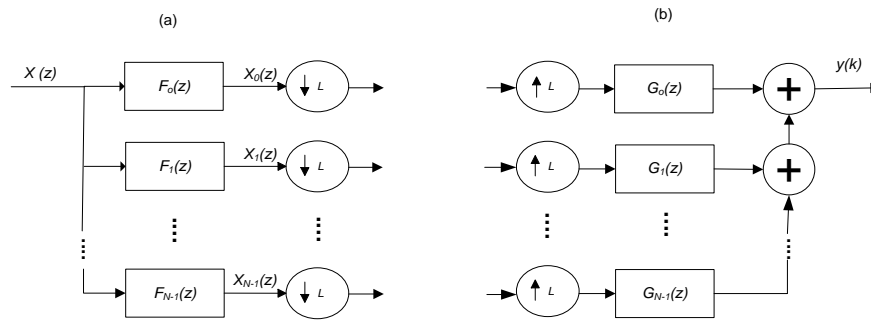


Figura. 14. Banco de filtros de Análisis; Banco de filtros de Síntesis

La señal descompuesta uniformemente, puede ser diezmada al mismo factor $1/N$ (máximamente o críticamente diezmada). En la Tabla 3, se puede visualizar las diferentes condiciones en la que se puede relacionar la señal original dividida en N -bandas con el factor de decimación/interpolación.

Tabla. 3.

Relación entre el número de Bandas y el factor de decimación

CONDICIÓN	OBSERVACIÓN
$L = N$	Maximamente o críticamente decimado, número de muestras en subbandas es idéntica al factor de decimación, no hay pérdida de información
$L > N$	Existe pérdida de información por el efecto <i>aliasing</i> , no permite la recuperación de la señal original
$L \leq N$	No máximamente decimado o sobremuestreado, se puede mantener la información debido a la interacción entre la sección de análisis y síntesis. Aumenta la carga computacional.

En la Figura 15, se visualiza el resultado de usar *SAF* críticamente muestreado y sobremuestreado.

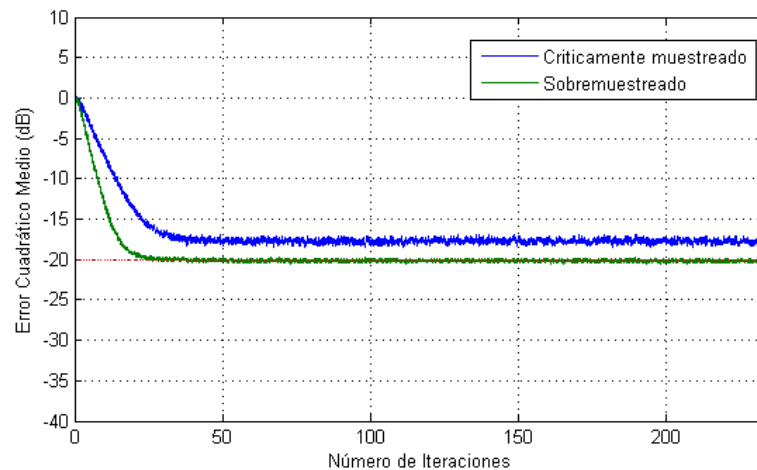


Figura. 15. Curva de MSE de SAF $L=N$ y $L<N$ con 4 bandas

3.5.2 Diezmadores e Interpoladores

Los diezmadores e interpoladores, son conversores de frecuencia de muestreo, que permiten obtener una frecuencia de muestreo compatible al sistema. Como lo explica (García López, 2007), estos usan filtros digitales diseñados para eliminar el efecto de *aliasing* y *band-edge* respectivamente, disminuyendo la distorsión producida en los procesos intermediarios de conversión.

Para la generación de las secciones de bancos de filtros de análisis y de síntesis, se tuvo en cuenta el número de bandas a descomponer, el factor de solapamiento (*overlapping*) y el tamaño del filtro de análisis, cuya ecuación es:

$$M = 2 * K * N \quad (3.14)$$

Donde K es el factor de solapamiento y N el número de Sub-bandas. El diseño de un prototipo de filtros con N -bandas, usa el algoritmo Parks-McClellan, tomado del paper (McClellan & Parks, 2005), del cual, ayudó a generar los bancos de filtros de análisis y síntesis, sin embargo, se puede generar los bancos de filtros usando diferentes diseños como: coseno modulado, Pseudo-QMF, banco de filtros DFT, bancos de filtros de reconstrucción perfecta, entre otros. Para el desarrollo del presente trabajo, se diseñó con cada tipo de banco de filtros a fin de analizar su comportamiento a la aplicación deseada.

La correcta selección de los bancos de filtros, permiten disminuir los problemas de distorsión de la señal, *aliasing*, retrasos, costo computacional, etc. Lo primordial de los diseños anteriormente mencionados es, que ayudan a mejorar y disminuir el tiempo de cálculo en un sistema, por ejemplo: los bancos de filtros de reconstrucción perfecta; garantizan la disminución del *aliasing*, generando una similitud de la señal de entrada a la salida del sistema, no obstante, tiene un retraso a la salida del mismo. Los bancos de filtros de coseno modulado; realizan una modulación por coseno, permitiendo diseñar e implementar bancos de filtros con un gran número de subbandas. Y los bancos de filtros en el dominio de la transformada; permiten trabajar con aplicaciones que requieren una baja convergencia, bajo costo computacional y longitud del filtro alto como por ejemplo la cancelación del eco acústico.

Punto importante antes del diseño de los bancos de filtros es el factor de solapamiento u *overlapping*.

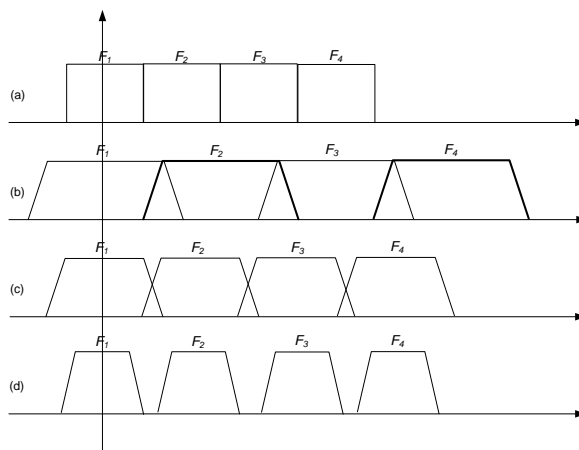


Figura. 16. Tipos de solapamiento en los Bancos de Filtros

La Figura 16 tomada de la tesis doctoral (Garcia, 2006), muestra los tipos de solapamiento presentes en los bancos de filtros en 4 bandas. En el literal (a) muestra un filtrado ideal, en la práctica, esto no es posible debido a la complejidad de tener filtros ideales en el sistema. En (b) es llamado *solapamiento*, este tipo de solapamiento es usado en aplicaciones como analizadores de espectro, debido a que

necesita varias bandas submuestreadas. En (c) llamados *filtros de solapamiento marginal*, es usada cuando se desea que exista similitud entre la señal de entrada $x(k)$ y la señal de salida $y(k)$ y (d) llamado *no-solapado*, es usado por ejemplo en la multiplexión en tiempo a frecuencia (TDM-FDM). (a) (b) y(c) son importantes y su uso dependerá del sistema.

En la simulación, la verificación del solapamiento de los banco de filtros se lo realizó usando la herramienta *SvTool* de Matlab®, se pudo observar el rango de frecuencia usado y el tipo de solapamiento, uno puede controlar este factor realizando un corrimiento de frecuencia K .

3.5.3 Bancos de filtros en el Dominio de la Transformada

El filtrado adaptativo en el dominio de la transformada, es una alternativa de solución al problema complejo de trabajar con la estructura adaptativa FIR asociando al algoritmo LMS en el dominio del tiempo, esta estructura, genera un alto costo computacional cuando las aplicaciones como la cancelación del eco acústico requieren de una longitud de filtro alto y baja convergencia.

Los filtros adaptativos en el dominio de la frecuencia FDAF como parte del TDAF, facilitan el cálculo de la transformada rápida de Fourier FFT o transformada de Fourier discreta DFT, debido a que, existen algoritmos implementados que pueden ser usado.

3.6 DISEÑO DE FILTROS ADAPTATIVOS EN SUBBANDAS

Teniendo el conocimiento previo del ambiente laboral a analizar, la estructura para el mejoramiento de la señal de voz, los banco de filtros y el criterio para la elección de filtros y sus componentes; se diseñó el filtro adaptativo con estructura en subbandas, necesarios para la consecución del objetivo del proyecto. La idea principal del filtrado adaptativo en subbandas es, la de descomponer un filtro adaptativo de alto orden mediante un conjunto de subfiltros de bajo orden. La

descomposición de la señal en múltiples canales paralelos facilita el procesamiento de la señal de manera eficaz. Además permite suprimir bandas que no contienen la información deseada o bandas ruidosas.

La señal de entrada $\mathbf{x}(k)$ y la señal deseada $\mathbf{d}(k)$ se descomponen en bandas de frecuencias usando banco de filtros de análisis $F_i(z), i = 0, 1, \dots, N - 1$. Esta señal es diezmada a una tasa de frecuencia más baja, permitiendo reducir el rango dinámico espectral en cada subbanda, aumentando así, la velocidad de convergencia del sistema. De acuerdo al error producido en cada subbanda por la decimación y por la reconstrucción de la señal, la estructura *SAF* se divide en estructura de lazo abierto y estructuras de lazo cerrado.

3.6.1 Estructura de lazo abierto

La Figura 3, muestra la estructura de lazo abierto donde; La señal de entrada $\mathbf{x}(k)$ y de referencia $\mathbf{d}(k)$ fueron divididas en subbandas por un banco de filtro de análisis y luego diezmada por un factor L . La señal de entrada ya diezmada en subbandas, fue filtrada por una matriz de filtrado adaptativo o subfiltros de análisis, misma que fue comparada con la señal deseada que igual que la entrada se encuentra dividida en subbandas. El error generado, fue ingresado a un banco de síntesis a fin de generar las señales de salida o señal completa (Diniz, 2008). El objetivo del lazo abierto fue de minimizar el error en cada subbada, la sumatoria de todos los MSE de cada subbanda, formaron la señal de error de banda completa, expresada por la siguiente ecuación:

$$J_{SB} = \sum_{i=0}^{N-1} E\{|e_{i,D}(k)|^2\} \quad (3.15)$$

Donde el operador $|\cdot|$, devuelve el valor absoluto de la operación, debido a la complejidad operacional.

3.6.2 Estructura de lazo cerrado

La estructura de lazo cerrado de la Figura 17, a diferencia del lazo abierto, el error se evalúa en la banda completa. Para el diseño, la señal de entrada $x(k)$ fue particionada y diezmada en subbandas, la señal de salida $y(k)$, fue reconstruida usando los banco de filtros de síntesis para luego ser comparada con la señal deseada $d(k)$, misma que fue conservada en todo su espectro. Esta señal de error $e(k)$, es dividida de igual manera en subbandas usando el mismo banco de análisis, ya diezmada, pasa por los subfiltros adaptativos, realimentado el error generado. Lo que se obtuvo del lazo cerrado, es un mejor rendimiento MSE debido a la retroalimentación del error.

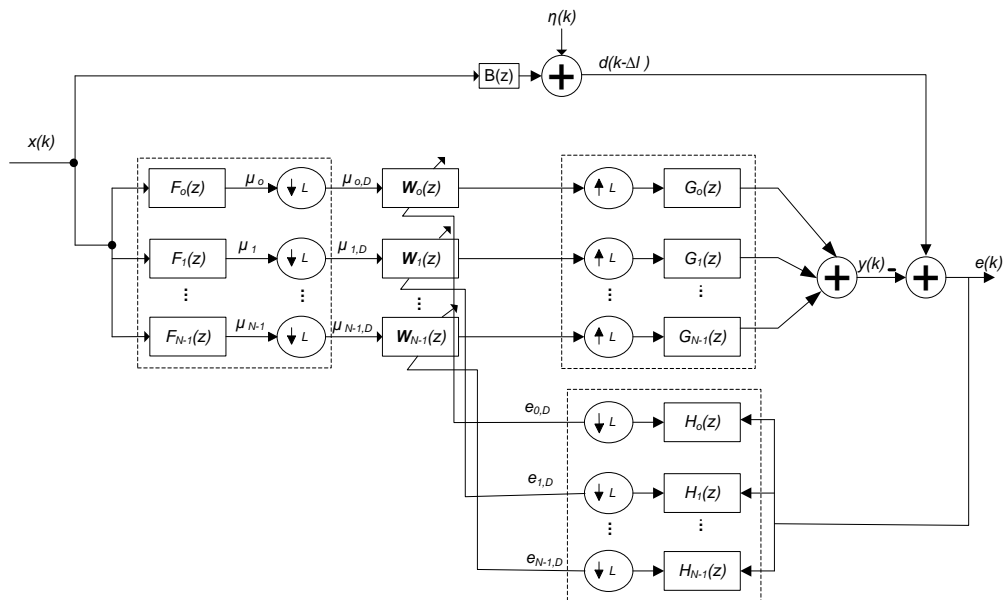


Figura. 17. Estructura de lazo cerrado de un Filtro Adaptativo en subbandas

Un problema que se presentó entre las dos estructuras fue el retraso que generan durante la reconstrucción de la señal, esto ocurre debido a la falta de optimización que presenta en la división de la señal en N-bandas más pequeñas, característica propia de los SAF al dividir el espectro, sin embargo, este sistema beneficia en muchas aplicaciones anteriormente nombradas y para la aplicación propuesta (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009). De igual manera SAF de lazo abierto comparado con la estructura de lazo cerrado, el error de banda completa resulta ser mayor,

debido a que el algoritmo trata de minimizar la varianza del error de cada subbanda y no la varianza del error de banda completa.

La estructura de lazo cerrado fue recomendada por su característica de retroalimentación, estos datos al ingresar nuevamente, permiten controlar de mejor manera al proceso. Sin embargo, no fue usado debido por su alto costo computacional y por el costo económico que involucra desarrollar esta estructura, cabe recordar que el objetivo del proyecto es presentar un algoritmo de bajo costo para la Institución.

3.6.3 Diseño y análisis del comportamiento *SAF*

El libro (Moonen, 2002) recomienda dos criterios para el diseño *SAF*: La selección de la frecuencia, que permite reducir el efecto de *aliasing* que se genera en cada subbanda en los filtros de análisis. Y reconstrucción perfecta, como su nombre lo indica, permite tener una copia exacta de la señal después de ser procesados por los bancos de filtros.

Con dichas recomendaciones, se simuló con Matlab® tres algoritmos adaptativos con estructura en subbandas. Se inició con la generación randómica de la señal de entrada, misma que está relacionada entre sí a través de un sistema lineal para generar la señal deseada más ruido introducido. La primera simulación (Figura 18 y Figura 19, *SAF* con QMF Diniz) fue realizada con la estructura en cuatro subbandas de lazo abierto críticamente decimada y con el algoritmo LMS (Diniz, 2008), cuya señal de entrada al sistema fue *randómica*. El diseño del banco de filtros fue bajo la estructura del coseno-modulado con una frecuencia de corte de $\pi/2N$, dando como resultado un solapamiento marginal a la salida del sistema. El factor de convergencia o tamaño de paso u usado fue de 0.001.

La siguiente simulación fue basada en cuatro subbandas de *SAF* con el algoritmo LMS (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009) cuyo factor de convergencia usado fue de 0.001 y un tamaño de filtro de 32 (Figura 18 y Figura 19, *SAF* con QMF). El

factor de decimación corresponde al sobremuestreado y con banco de filtros de tipo coseno-modulado.

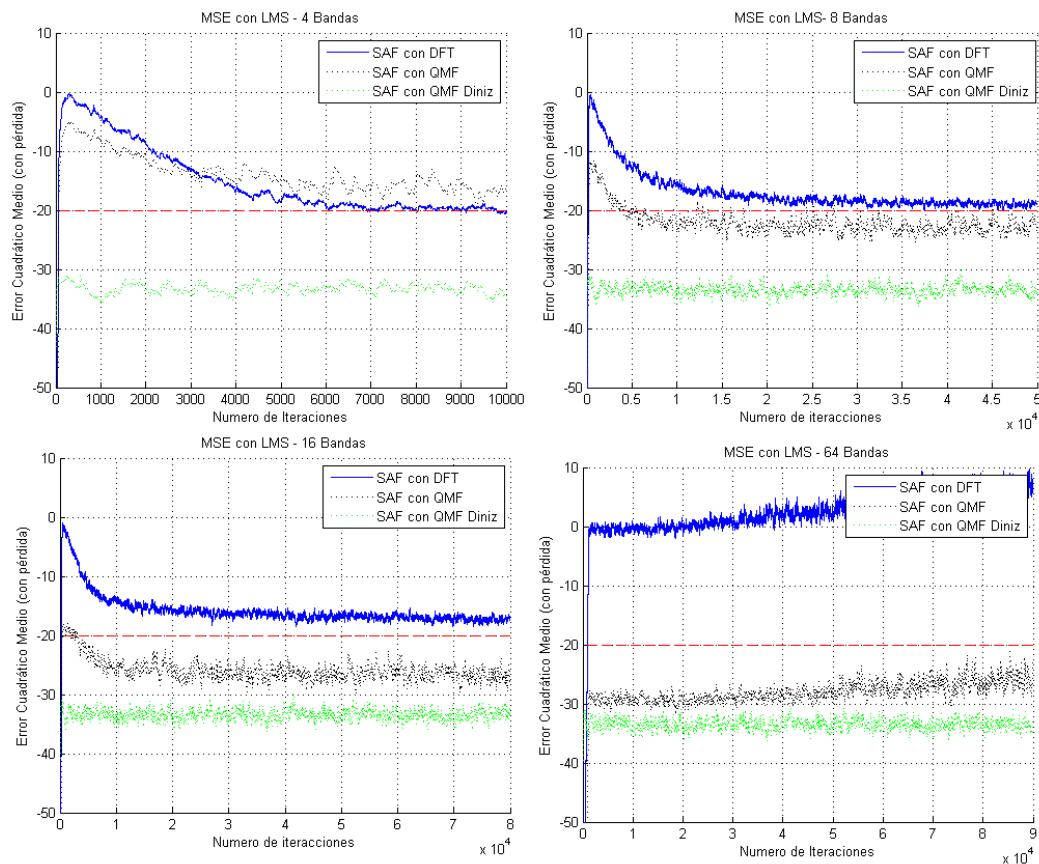


Figura. 18. MSE de SAF con LMS y $M=32$

Por último, se simuló con cuatro subbandas de SAF con el algoritmo LMS (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009) con bancos de filtros de tipo DFT o modulación compleja (Figura 18 y Figura 19, SAF con DFT), cuyo uso es justificado, dado que es eficiente para aplicaciones de cancelación de ruido, disminuyendo el costo computacional.

Las simulaciones anteriormente diseñadas, fueron analizadas dividiendo la señal de entrada y deseada en varias subbandas y con un tamaño del filtro igual a $M=32$. Posterior a eso, se varió en número de subbandas N con un tamaño del filtro variable de $M=128, 256$, para así analizar su comportamiento.

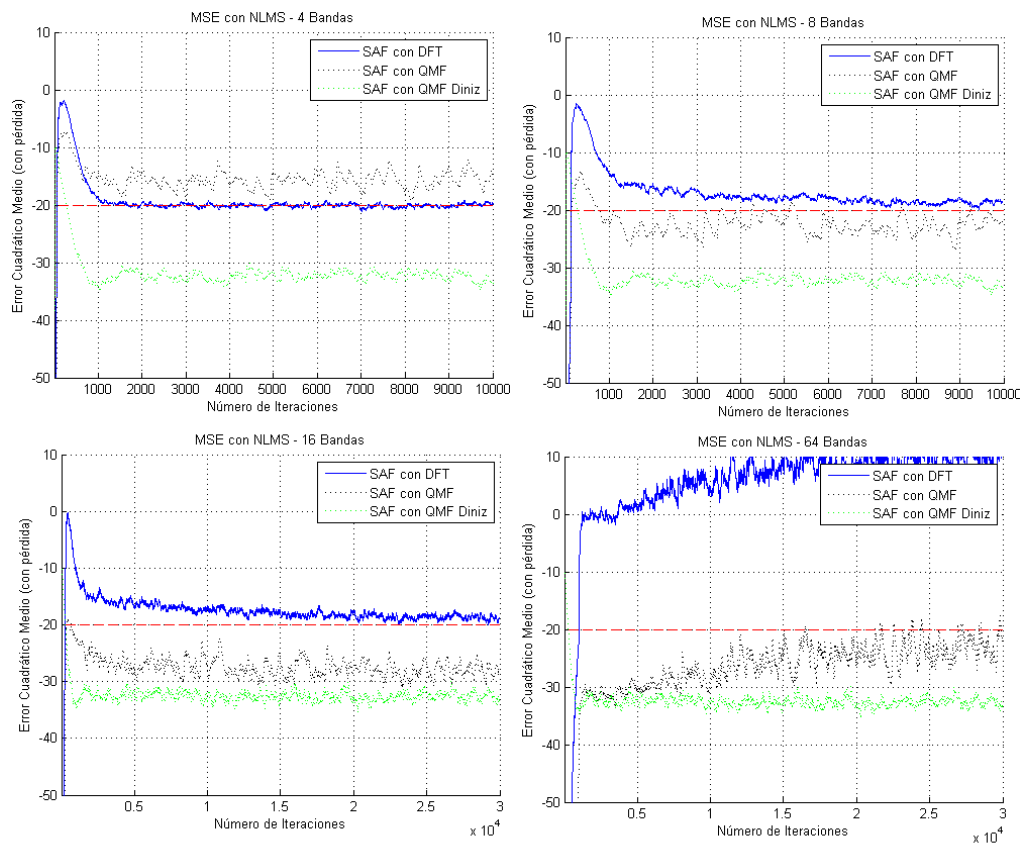


Figura. 19. MSE de SAF con NLMS y $M=32$

En la Figura 20, se puede visualizar los resultados consolidados de la división de la señal de entrada $x(k)$ y deseada $y(k)$ en 4, 8, 16 y 64 bandas usando el algoritmo LMS, con una tamaño de filtro adaptativo de $M = 128$ y un tamaño de paso u de 0.001. Donde, se apreció, que cuando aumenta el número de subbandas N , aumenta el tiempo de respuesta del algoritmo, además, los banco de filtros con modulación compleja de (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009) mostraron más estabilidad y menos perturbación que las dos curvas restantes.

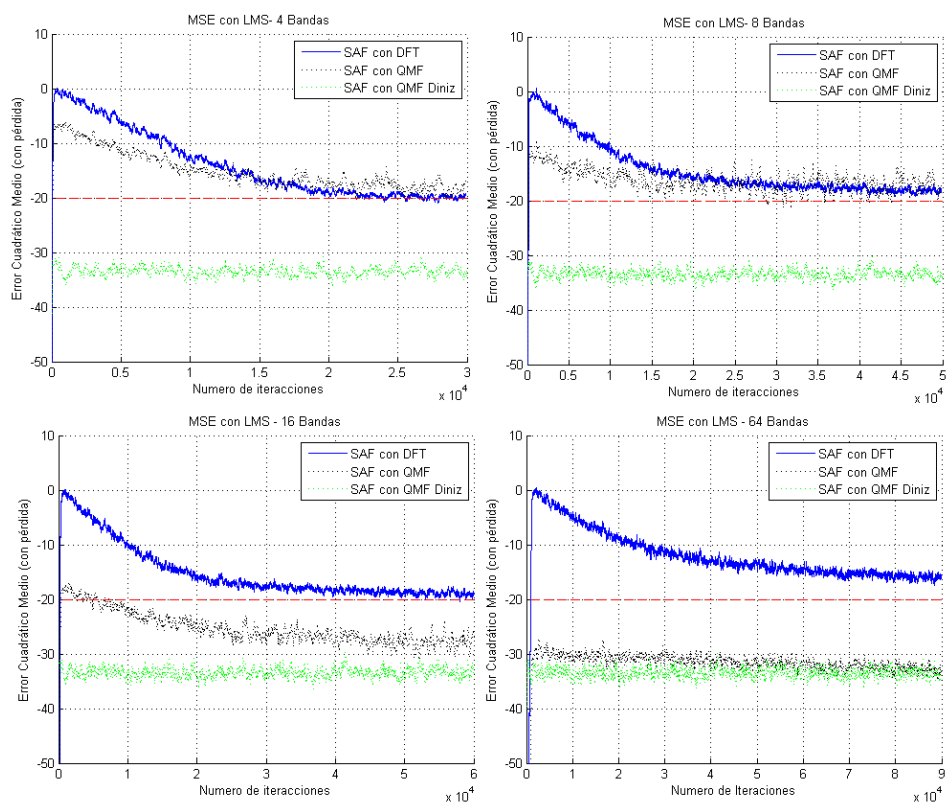


Figura. 20. MSE de SAF con LMS y $M=128$

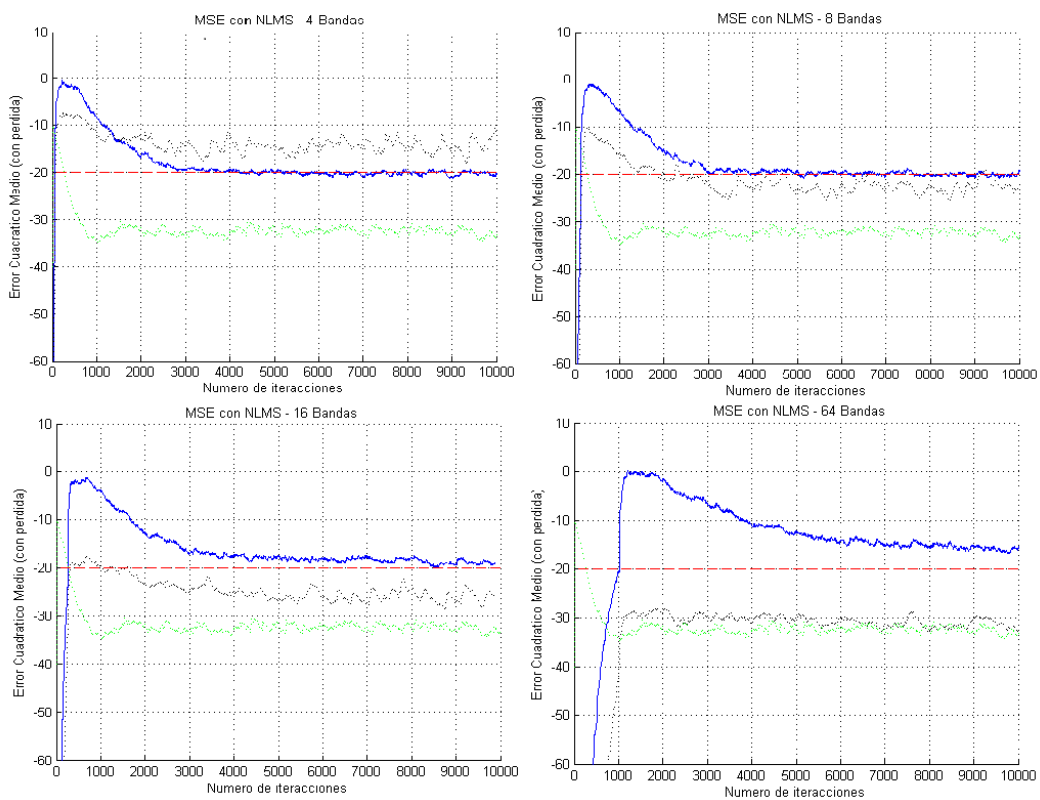


Figura. 21. MSE de SAF con NLMS y $M=128$

En la Figura 21, se puede visualizar los resultados consolidados de la división de la señal de entrada $x(k)$ y deseada $y(k)$ en 4, 8, 16 y 64 bandas usando el algoritmo NLMS, con una tamaño de filtro adaptativo de $M=128$ y un tamaño de paso u de 0.001. Se apreció que cuando aumenta el número de subbandas N , aumenta el tiempo de respuesta del algoritmo pero con una mayor estabilidad que el algoritmo LMS, además, los banco de filtros con modulación compleja de (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009) mostraron más estabilidad y menos perturbación que las dos curvas restantes.

En la Figura 22 y Figura 23, se puede visualizar los resultados consolidados de la división de la señal de entrada $x(k)$ y deseada $y(k)$ en 4, 8, 16 y 64 bandas con el algoritmo LMS y NLMS respectivamente, con una tamaño de filtro adaptativo de $M=256$ y un tamaño de paso u de 0.001.

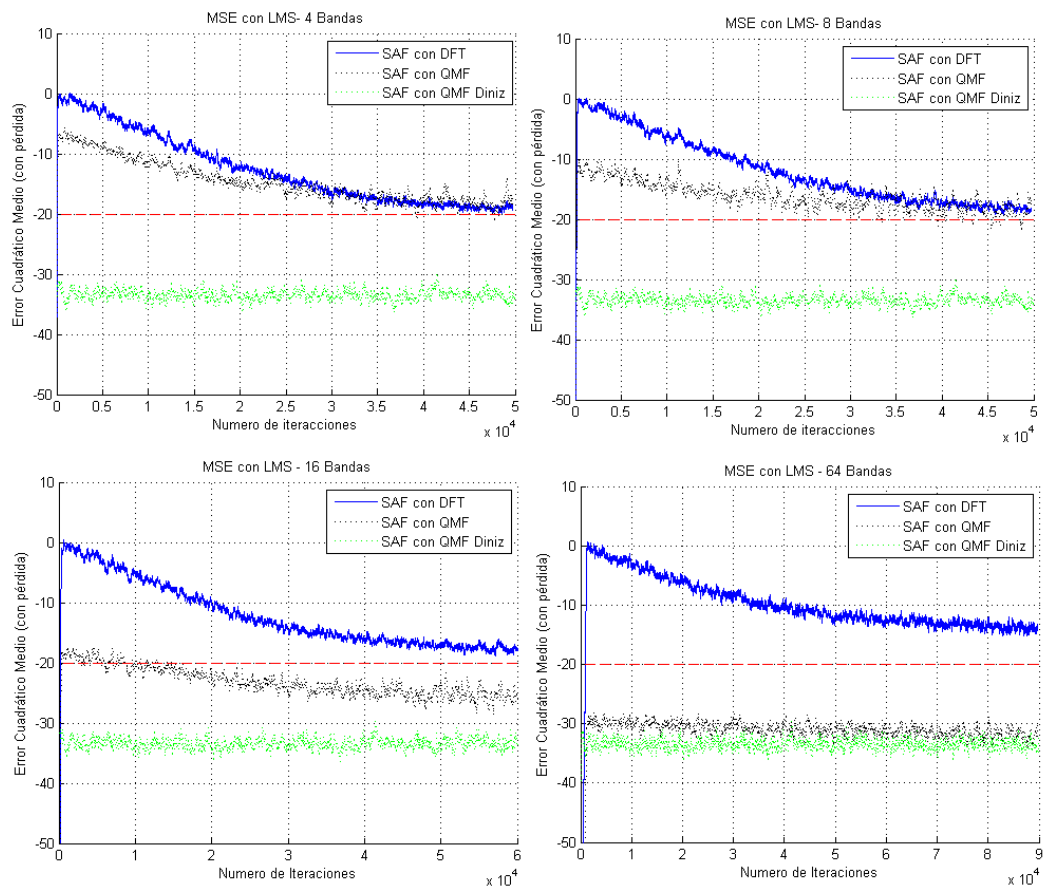


Figura. 22. MSE de SAF con LMS y $M=256$

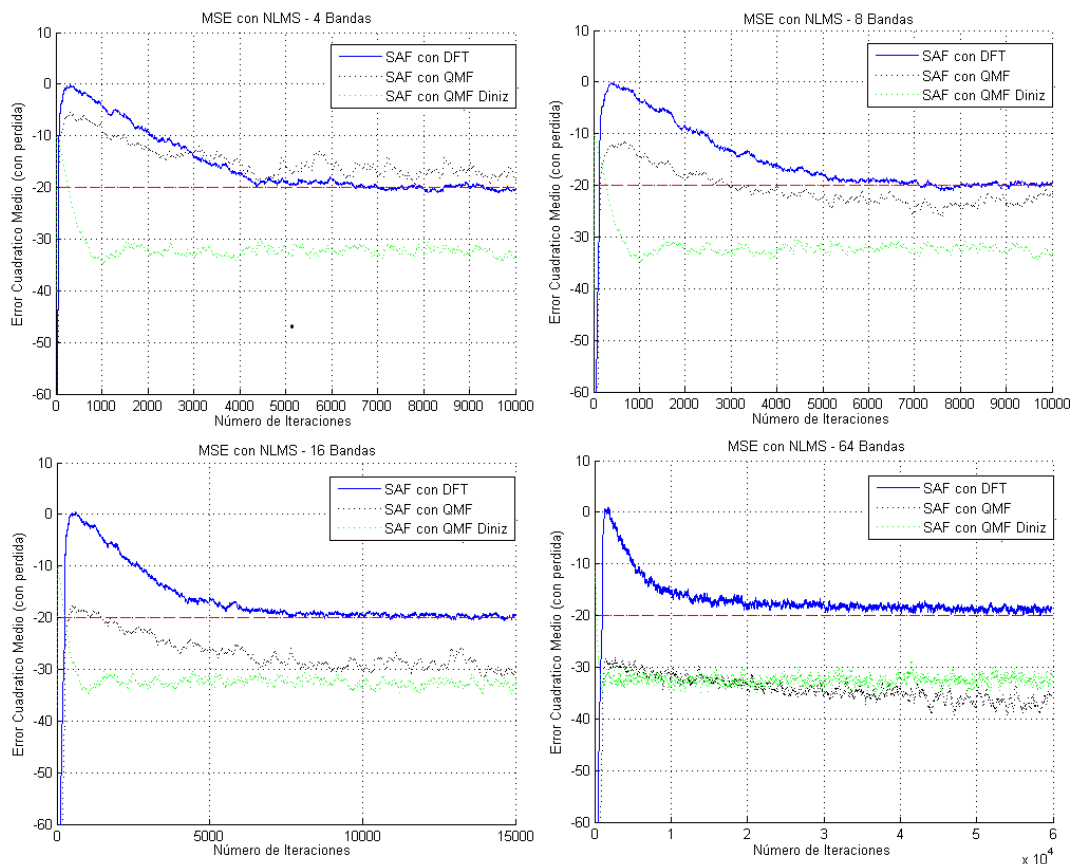


Figura. 23. MSE de SAF con NLMS y $M=256$

Se aprecia en las dos Figuras, que la carga computacional es mayor cuando aumentamos el número de subbandas con el algoritmo LMS. Al variar la longitud del filtro M , no influye directamente al comportamiento del sistema, es decir, no es un factor relevante para mejorar el rendimiento y la convergencia del algoritmo en subbandas. Se aprecia también, que el tipo de señal insertado trabaja eficientemente en bandas de $N=4$ y $N=8$, se puede mejorar al algoritmo usando N altos y variando el paso de adaptación, sin embargo, aumenta el costo debido al cálculo progresivo de μ .

3.6.4 Diseño de SAF para el mejoramiento de la voz mitigando el ruido

Esta Sección propone una solución al ruido presente cuando son chequeadas las aeronaves en tierra. El ruido producido por los aviones, impide que la comunicación por radio sea eficiente durante el chequeo sincronizado, por tanto, con los resultados

obtenidos en las secciones anteriores, se estructuró el diseño adaptativo en subbandas acorde al problema planteado.

El criterio para la elección del filtro de la Sección 3.3, permitió examinar y seleccionar el algoritmo que mejor se adapte a la cancelación de ruido, mismo que fue usado en la estructura para el mejoramiento de la señal de la Sección 3.4, siendo una alternativa de solución al sistema descrito. Sin embargo, el objetivo principal del proyecto es mejorar la señal de audio trabajando con filtros adaptativos en subbandas, por tal razón, en la Sección 3.5 se examinó los bancos de filtros a fin de obtener el diseño que mejor se comporte al sistema, para así, diseñar y seleccionar los filtros adaptativos con estructura en subbandas a fin de adaptarlo al problema de ruido presente durante el chequeo de una aeronave. A diferencia de la Sección 3.6, aquí se diseñará acorde al problema planteado.

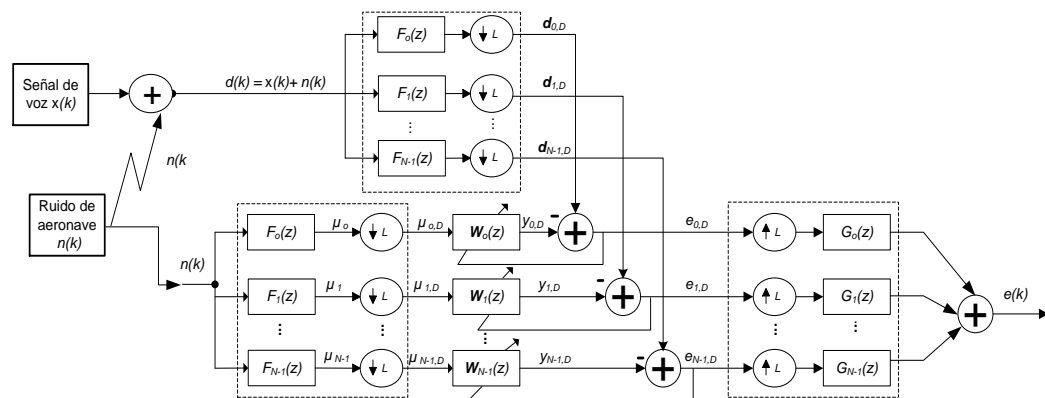


Figura. 24. Diagrama propuesto para la cancelación de ruido usando SAF

En la Figura 24, se visualiza la simulación realizada acorde al trabajo propuesto. La señal deseada $x(k)$ corrompida por el ruido $n(k)$ fue ingresada por el canal primario, y en el otro canal, se ingresó la señal de referencia, es decir el mismo ruido $n(k)$ correlacionado. Las señales ingresaron a los bancos de filtros con modulación compleja donde fueron decimadas a un factor L , los algoritmos usados fueron el LMS y NLMS. Punto importante analizado, fue el tamaño de paso u para aplicaciones de cancelación de ruido, lo importante es que la señal deseada sea escuchada y entendible en el menor tiempo posible luego de ser procesada en el

sistema, por consiguiente, con un u alto, el sistema converge rápidamente aunque haya presencia de ruido. Por último, se reconstruyó la señal deseada interpolando y aplicando nuevamente los bancos de filtros con modulación compleja. En la Figura 25, se visualiza la señal de voz y el ruido usados para el experimento.

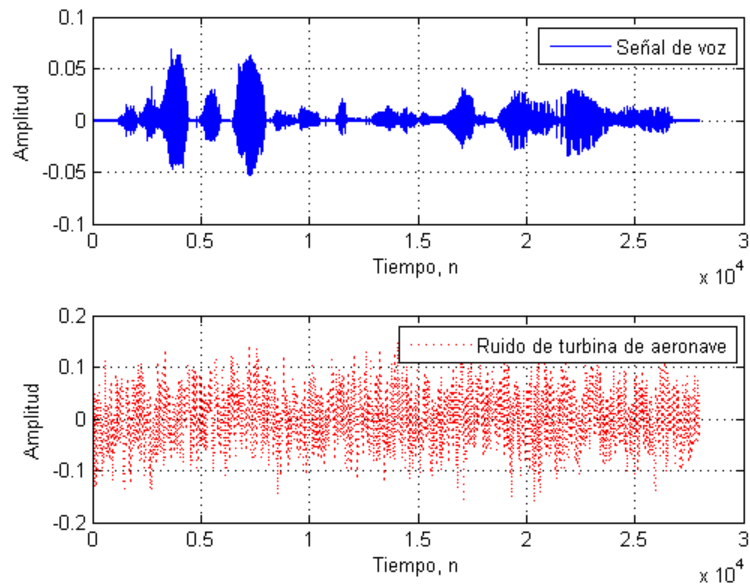


Figura. 25. Señal de voz y ruido de aeronave grabadas

El análisis de la relación señal-ruido, el MSE y la señal filtrada a la salida del sistema, fueron implementados en el programa de Matlab®, del cual, la señal deseada $x(k)$ fue comparada con la salida del algoritmo LMS y NLMS luego de ser procesados.

En la Figura 26, se puede visualizar, el comportamiento del algoritmo LMS y NLMS con respecto a la señal deseada para la aplicación de cancelación de ruido. Se observó que el algoritmo NLMS muestra mayor similitud a la señal deseada luego de ser procesada por todo el sistema.

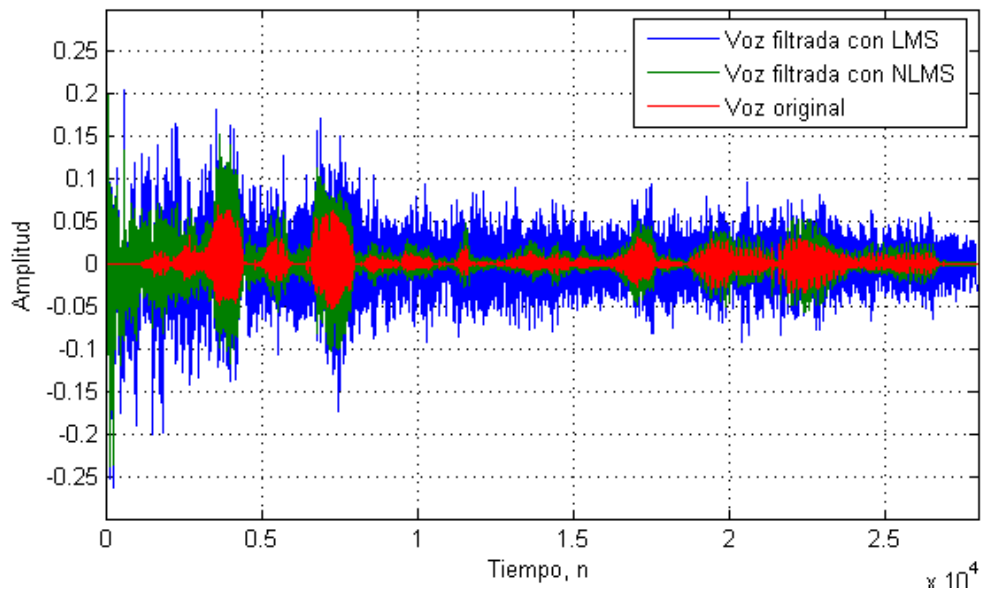


Figura. 26. Señal de voz, señales del algoritmo LMS y NLMS al final de SAF

En la Figura 27, se visualiza el comportamiento del MSE del algoritmo LMS y NLMS aplicado en la cancelación de ruido. Los dos algoritmos sufren atenuación debido al comportamiento del algoritmo en el sistema. El ruido insertado fue de -20 dB.

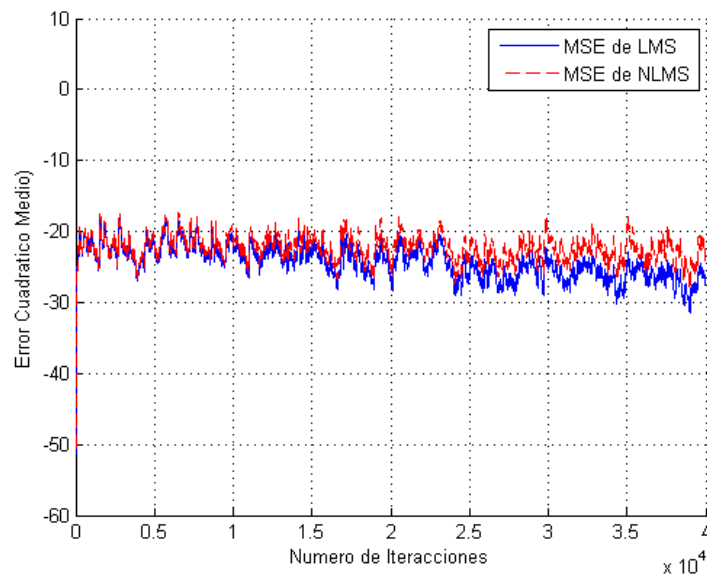


Figura. 27. MSE de los algoritmos LMS y NLMS usando SAF

Los resultados de la prueba de la cancelación de ruido en aeronaves, fueron plasmados en la Sección propuesta del capítulo cuatro.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo, se presenta los resultados obtenidos de cada uno de los diseños realizados en el capítulo 3 para así obtener el algoritmo que mejor se adapte a la cancelación del ruido en ambientes ruidosos.

Como primera parte, se realizó el análisis de los algoritmos adaptativos LMS, NLMS, y RLS presentados en la Sección 3.3, a fin de comprobar la teoría para seleccionar y acoplarla al sistema descrito. A continuación, se analizaron los filtros adaptativos con estructura en subbandas, a fin de proponer el mejor sistema que se acople al tratamiento de la señal de voz para la cancelación del ruido durante el chequeo de las aeronaves con los *headset* de comunicación, para ello, se tabularon los datos obtenidos en las pruebas de campo, mismas que fueron realizadas en cada una de las aeronaves de la FAE con el equipo Sonómetro a fin de simular el trabajo en un ambiente real.

4.2 TABULACIÓN DE LAS MEDICIONES DE CAMPO

Cumpliendo con las recomendaciones de medición descritos en el capítulo 2, se han obtenido los niveles de ruido de las aeronaves con el equipo *SoundPro SE/DL*, mismos que fueron descargados al programa *QuestSuite Professional II* a fin de conocer y relacionar los niveles de ruido a la aplicación simulada.

A continuación, en la Figura 28, se muestran los datos obtenidos de cada aeronave. Como se puede visualizar, los cuatro aviones analizados, superan los 100 dB de ruido, siendo perturbador para el oído humano cuando es expuesto a largos periodos de tiempo. De igual manera, con estos niveles de ruido, es imposible tener una comunicación verbal eficaz durante el chequeo, sino se tiene un equipo de *headset* de comunicación para intercambiar la información.

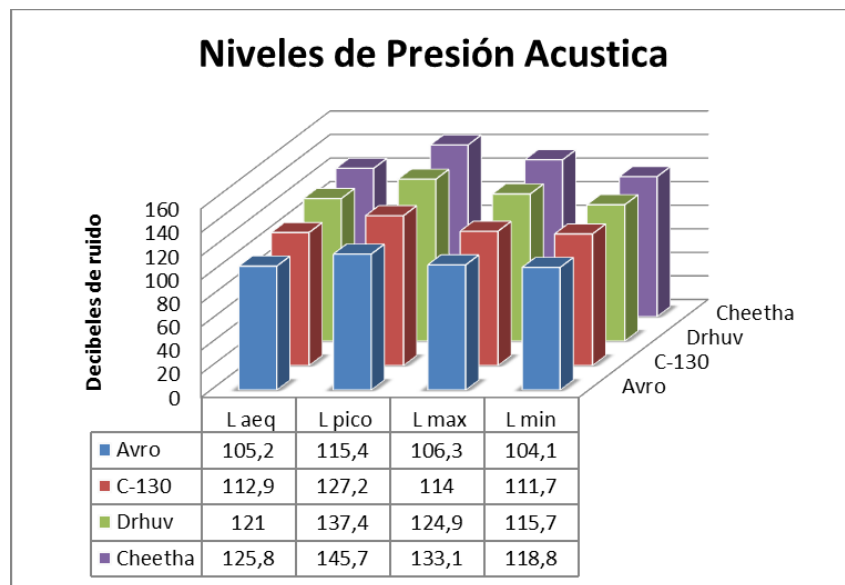


Figura. 28. Medición de los niveles de ruido en las aeronaves

4.3 ANÁLISIS DE LOS ALGORITMOS ADAPTATIVOS

Como se mencionó en el capítulo anterior, el objetivo del filtrado adaptativo es hallar los coeficientes del filtro, de tal manera que la señal de salida $y(k)$ se parezca a la señal deseada $d(k)$, con esta condición, el error cuadrático medio se minimizó dependiendo del algoritmo utilizado. En algunas aplicaciones como se mencionó en el segundo capítulo, el MSE no deberá minimizarse, al contrario, será la respuesta de nuestro sistema y será igual a la señal deseada o de referencia $d(k)$.

4.3.1 Algoritmo LMS

Los resultados obtenidos en el capítulo anterior con la herramienta de Matlab®, dieron como resultado las Figura 6 y Figura 7, donde se comprobó que el sistema

converge con pocas muestras cuando se usa un paso de adaptación grande, la señal de entrada está relacionada con un sistema lineal (filtro FIR), generando así la señal deseada. Se observó, que mientras más grande es el valor de μ , el sistema necesita menos muestras para converger, es decir, converge más rápido con un valor μ grande. Algunos libros recomiendan trabajar con un valor μ entre $0 < \mu < 0.00059$ (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009).

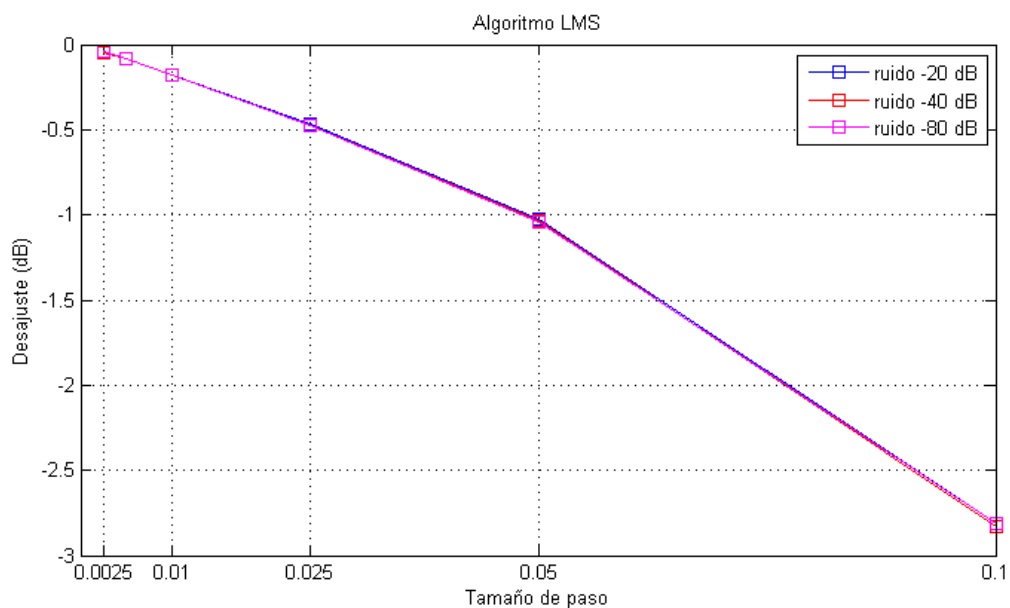


Figura. 29. Comparación del desajuste del Algoritmo LMS

En relación al error cuadrático medio, en la Figura 29 se resume los valores del MSE obtenidos con cada valor de μ . Cuando el ruido no está presente en la señal, el error tiende a 0, sin embargo, cuando está presente el ruido, el error se minimiza y tiende a disminuir su desajuste, concluyendo que: a más pequeño el tamaño de paso μ , más cercano el error a cero. La prueba fue realizada variando el ruido insertado (-20,-40 y -80 dB) a fin de analizar el comportamiento del algoritmo, se comprobó que no hubo mucha diferencia entre cada valor insertado.

Lo recomendable sería trabajar sin la presencia de ruido en el sistema, sin embargo, en la práctica, el ruido está presente en toda aplicación, por lo que trabajar con este elemento, hace que el sistema se acerque más a la realidad. En resumen, mientras más grande es el tamaño de paso μ , mayor es la velocidad de convergencia

del sistema, sin embargo, mayor es el ruido generado. Más adelante en la Sección 4.4, se analiza el comportamiento del algoritmo LMS en la cancelación de ruido adaptativo.

4.3.2 Algoritmo NLMS

Se resume que el algoritmo converge satisfactoriamente al estar relacionado la señal de entrada $x(k)$ a un sistema lineal. En la Figura 8 y 9 se observa, que con un tamaño de paso μ igual a 0.1, el algoritmo converge y comienza a estabilizarse aproximadamente en 600 muestras. Con un tamaño de paso μ igual a 0.0025, el algoritmo converge aproximadamente en 35000 muestras.

Al igual que el algoritmo LMS, mientras más pequeño es el valor de μ , el sistema necesita más número de muestras para converger, y viceversa. Lo óptimo sería usar μ altos, para que el sistema converge más rápido, sin embargo, en la teoría, el valor de μ está limitado entre $0 < \mu < 2$, debido a que valores superiores a este, el algoritmo diverge. Como el ruido está presente en la señal, el MSE tiende a minimizarse a cero. En la Figura 30, se resume los valores obtenidos de cada valor de μ , el desajuste es menor cuando el valor de μ es pequeño.

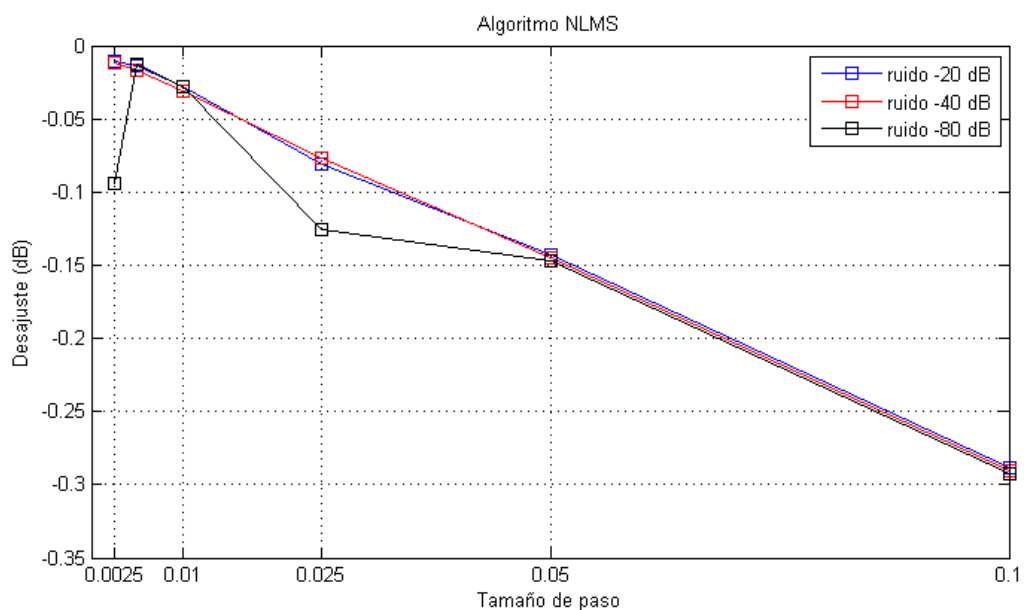


Figura. 30. Comparación del desajuste del Algoritmo NLMS

4.3.3 Algoritmo RLS

En la Figura 10 del capítulo anterior, se observa que; mientras más pequeño es el valor de λ , más rápida es la convergencia del algoritmo, siendo exitoso para aplicaciones que requieren una rápida respuesta. Sin embargo, el algoritmo tiene un comportamiento inestable, por lo que, inesperadamente deja de converger. En la Figura 31, se visualiza el desajuste de cada valor de λ , donde el mínimo error se encuentra en λ grandes.

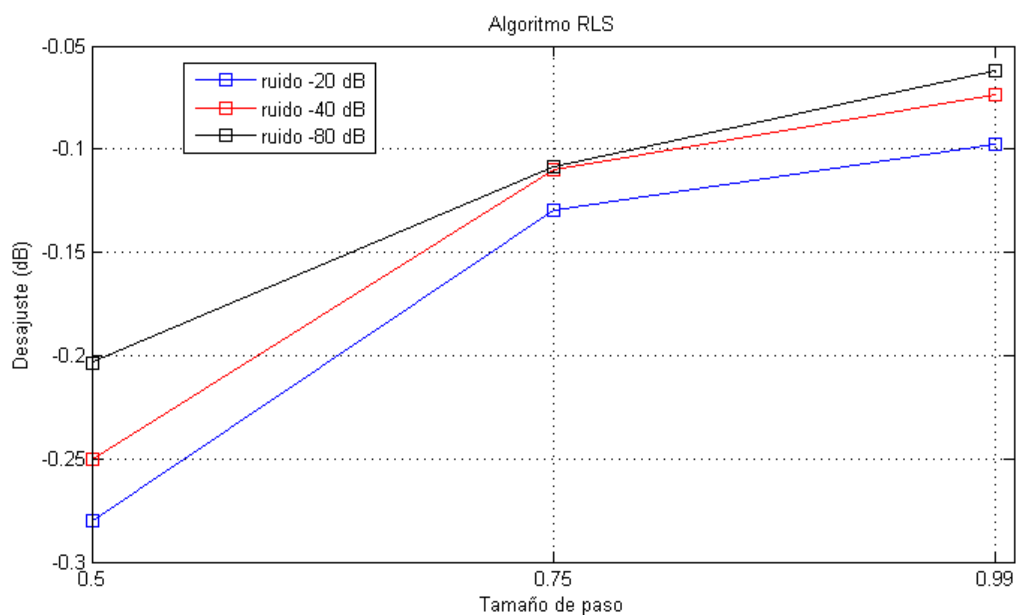


Figura. 31. Comparación del desajuste del algoritmo RLS

Consolidando los tres algoritmos analizados en la Figura 32 se resume:

- El algoritmo RLS converge más rápido que el algoritmo LMS y NLMS.
- El algoritmo NMLS es más estable, al momento que converge.

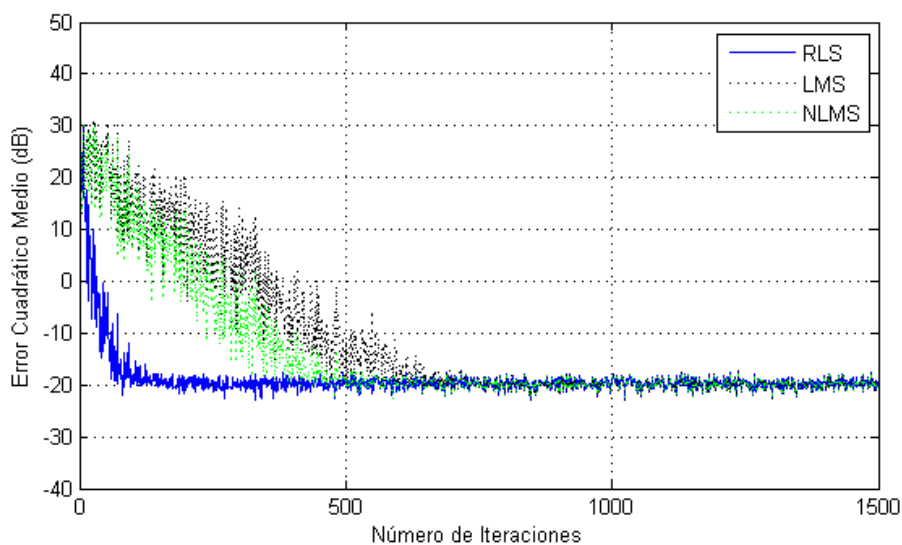


Figura. 32. Algoritmos LMS, NLMS y RLS

En la Tabla 4, se resume las características de cada uno de los algoritmos analizados de acuerdo a los resultados obtenidos en cada simulación, sus resultados ayudaron y contribuyeron a seleccionar el adecuado algoritmo para la aplicación de cancelación de ruido.

Tabla. 4.

Resumen de los Algoritmos analizados

ALGORITMO	TAMAÑO DE PASO	OBSERVACIÓN
LMS	μ pequeño	Necesita mayor número de muestras para que el sistema converga
	μ grande	La velocidad de convergencia es mayor y más eficiente, sin embargo, el ruido aumenta
NLMS	μ pequeño	Necesita mayor número de muestras para converger. Es más estable que el LMS
	μ grande	La velocidad de convergencia es mayor, sin embargo, el ruido aumenta. Óptimo para aplicaciones de cancelación de ruido
RLS	λ pequeño	La velocidad de convergencia es mayor, pero es más inestable y puede no converger.
	λ grande	Disminuye la velocidad de convergencia, y puede no converger de manera estable.

4.4 ANÁLISIS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA SEÑAL

Posterior al estudio de los algoritmos, se analizó el esquema del mejoramiento de la señal de voz de la Figura 11, cual fue usada para modelar el sistema de acuerdo a las exigencias del entorno laboral del cual está orientada el presente trabajo investigativo.

La señal deseada $\mathbf{x}(k)$ y el ruido $\mathbf{n}(k)$, ingresan por el canal primario, mientras que el mismo ruido $\mathbf{n}(k)$ correlacionado ingresa por el canal secundario. Se asignó un paso de adaptación μ variable, a fin de obtener el valor óptimo a la aplicación deseada. Los parámetros procesados dieron como resultado una señal de audio filtrada a la salida del sistema. Como se mencionó en la Sección 3.4, los algoritmos utilizados fueron el LMS y NLMS. Se simuló con tres archivos de voz (una letra, una frase y una instrucción acorde al entorno laboral) donde cada señal fue corrompida por ruido AWGN y ruido generado por una aeronave. Para garantizar la eficiencia de la estructura, se atenuó a la señal de entrada $\mathbf{x}(k)$ hasta obtener un SNR de -60 dB. El ruido de aeronave se asemeja a un avión de transporte C-130, del cual fue descargado para la simulación. La Figura 33, muestra el MSE de la señal de audio (instrucción) con un tamaño de paso μ variable y longitud del filtro de $M=32$.

Lo que se visualiza en la Figura 33, es el paso de adaptación y el desajuste del algoritmo LMS y NLMS, donde se comprobó que con un paso adaptativo μ pequeño se obtiene el menor MSE, más allá de estos valores, simplemente los algoritmos dejaron de ser óptimos. Al variar el tamaño de paso, se observa que el MSE disminuye cuando los valores de μ son muy bajos. En el algoritmo LMS, el mínimo valor del MSE fue de 0,012 cuando tiene un tamaño de paso igual a 0,00003. Mientras que, para el algoritmo NLMS el mínimo valor MSE fue 0,0104 cuando el tamaño de paso fue 0,0001. La señal filtrada es considerada “ENTENDIBLE” en cada uno de los valores de la Figura 33.

En la Figura 34, se simuló la señal de voz (instrucción) con el ruido de una aeronave, donde se observó que; el MSE es bajo cuando presenta un tamaño de paso

pequeño, es decir, por más que se varié el paso de adaptación no hay mejoría del MSE. Para el algoritmo LMS, el MSE mínimo estuvo cuando μ es igual a 0,0007, mientras que para el algoritmo NLMS, el MSE mínimo estuvo cuando μ es igual a 0,0002. El audio filtrado presentó un severo ruido a la salida del sistema, sin embargo, es entendible el mensaje.

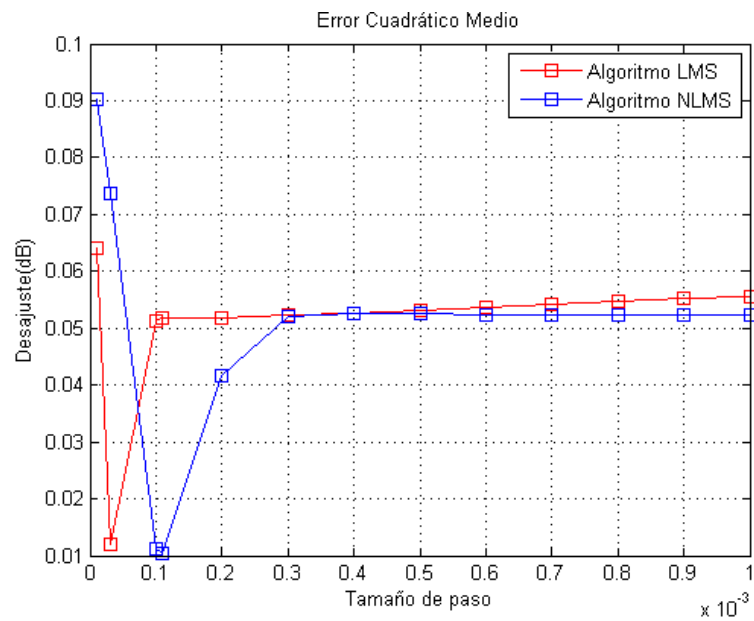


Figura. 33. Filtrado de la señal de voz y ruido AWGN

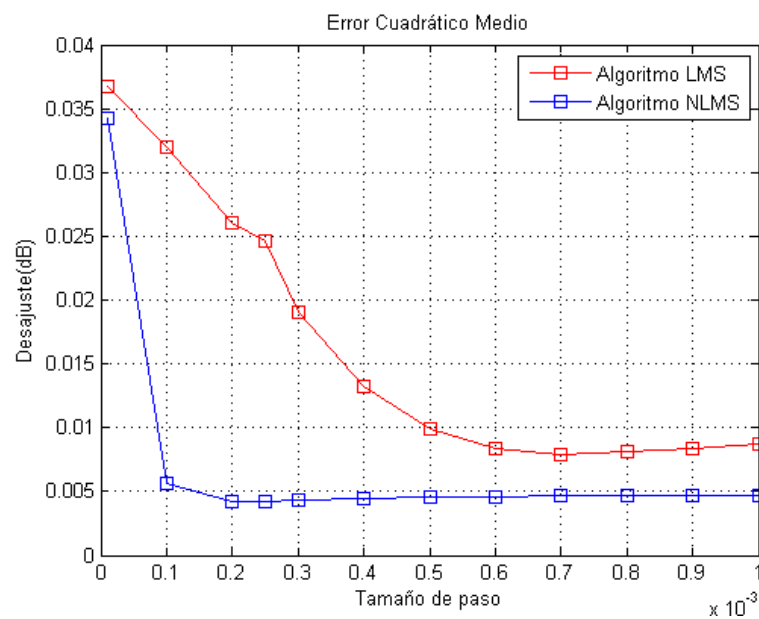


Figura. 34. Filtrado de la señal de voz y ruido de aeronave

En la Figura 35, se presenta los resultados del filtrado de un audio sin interferencias (frase) y un ruido AWGN. Se observó que los valores óptimos del MSE fueron cuando el tamaño de paso es pequeño. Para el algoritmo LMS y NLMS, el MSE óptimo fue cuando el tamaño de paso es igual a 0,00004, y 0,00013 respectivamente.

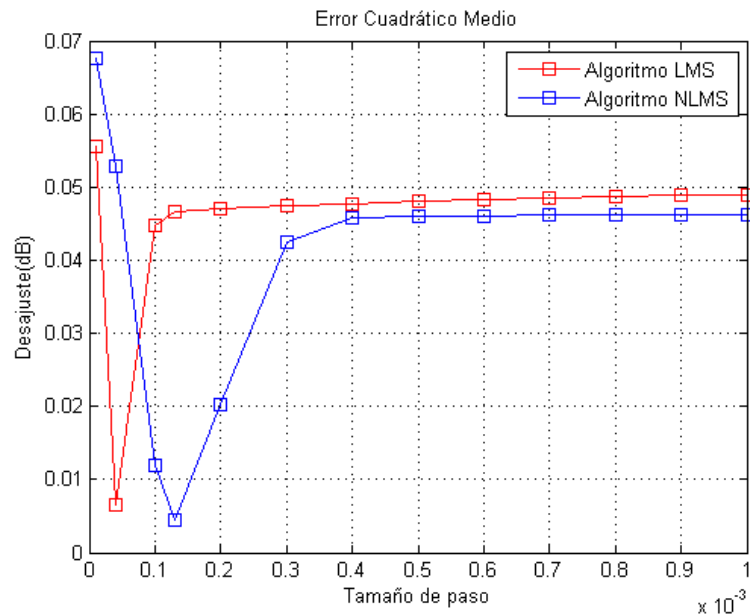


Figura. 35. Filtrado de la señal de voz nítida y ruido AWGN

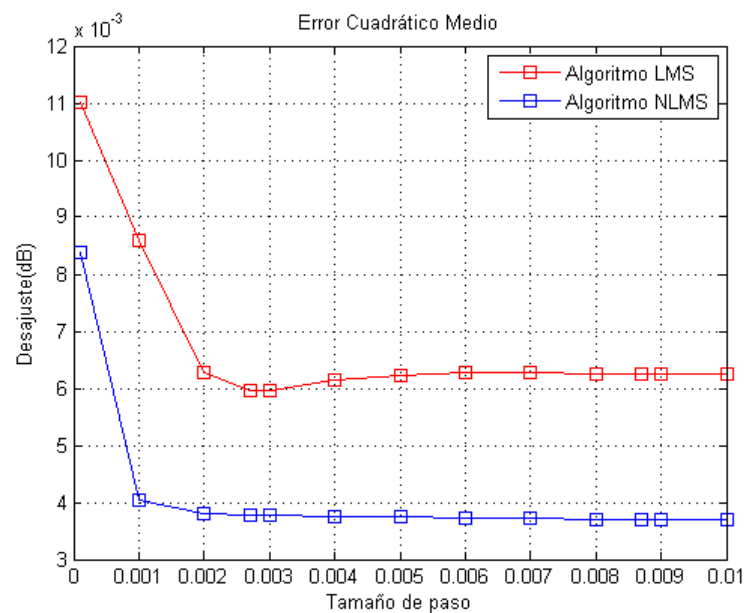


Figura. 36. Filtrado de la señal de voz nítida y ruido de aeronave

En la Figura 36, se observa el audio (frase) adherido al ruido de aeronave, presentan un ligero aumento del tamaño de paso, sin embargo, cumple con la teoría en la aplicación del filtrado de la voz en ambientes altamente ruidosos. El μ óptimo para el algoritmo LMS y NLMS fue de 0,0027 y 0,0087 respectivamente.

En la Figura 37, se visualiza el MSE de la señal de voz de una letra y el ruido AWGN. Para el algoritmo LMS y NLMS, los valores del MSE mínimos fueron cuando μ fue igual a 0,00002 y 0,0001 respectivamente.

En la Figura 38, se visualiza los resultados obtenidos de la simulación de la señal de audio de una letra y el ruido de una aeronave. Se observó que hubo una cierta variación del MSE, sin embargo, los valores de μ siguen siendo bajos y cumplen la teoría para la aplicación deseada.

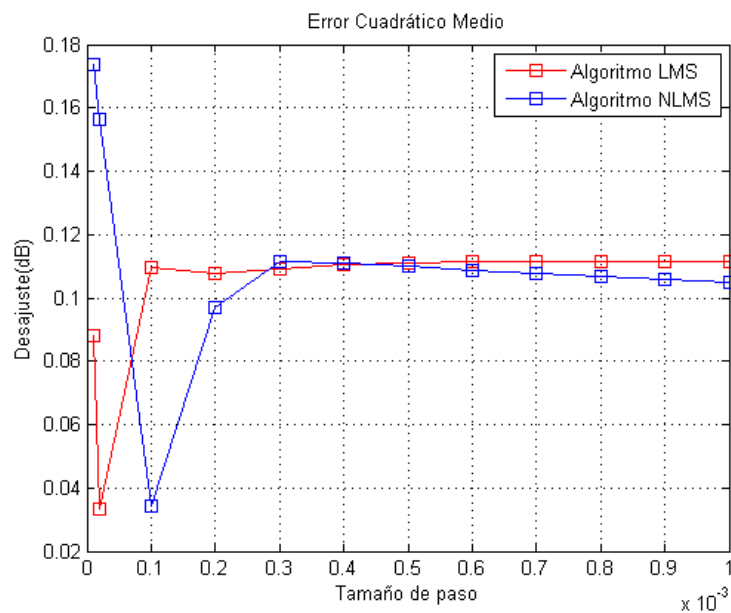


Figura. 37. Filtrado de la señal de voz “letra A” y ruido AWGN

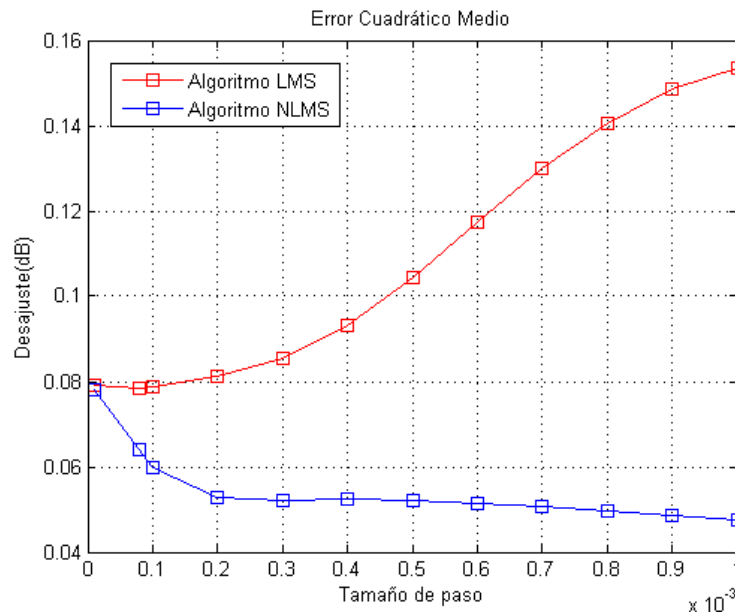


Figura. 38. Filtrado de la señal de voz “letra A” y ruido de aeronave

Realizando un análisis de los resultados obtenidos, se resume que; el rango del tamaño de paso μ óptimo la cancelación de ruido de aeronaves en la comunicación por radio es de: $0,0001 < \mu < 0,008$ para el algoritmo LMS, y $0,001 < \mu < 0,008$ para el algoritmo NLMS. Estos valores son de acuerdo a la simulación de la señal de audio y el ruido en aeronaves.

Una vez identificado el rango del tamaño de paso μ óptimo para la aplicación deseada, se varió la longitud del filtro M, a fin de obtener el tamaño mínimo óptimo para dicha comunicación por radio, misma que garantice la efectividad del sistema y que el costo computacional sea pequeño. Para ello, se realizó un trabajo de campo a fin de asimilarlo y probarlo en el entorno laboral, en el cual, varias personas ayudaron a calificar a la señal deseada obtenida a la salida del sistema. En la Figura 39, se muestra, los resultados de la cancelación de ruido donde; 1 es el nivel más bajo de entendimiento, aquí el ruido está presente y por ende no se entiende el mensaje; mientras que 5, es el nivel donde el mensaje es entendible sin presencia de ruido.

En la Figura 39, se apreció que con una longitud del filtro M de 16 y 32, se receipta el mensaje de manera entendible y con una ligera presencia de ruido, el MSE

de 0,003 fue considerado aceptable a la salida del sistema. La simulación fue realizada con el algoritmo LMS y NLMS, del cual, NLMS fue el algoritmo que mejor estado de claridad presentó al usar la señal de audio, afirmando la teoría analizada en el Capítulo 2. De igual modo, se comprobó que la longitud del filtro no es un factor predominante para la eficiencia del sistema.

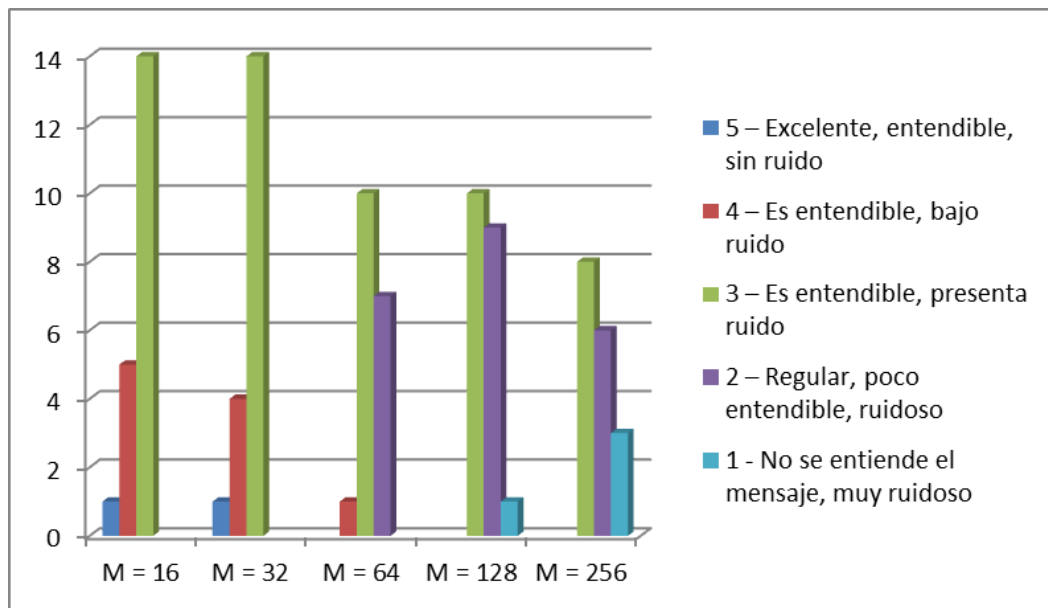


Figura. 39. Calificación de la señal de audio con diferente tamaño del filtro

4.5 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA SAF

Una vez seleccionado el paso de adaptación μ y el tamaño del filtro M óptimo para la aplicación de cancelación de ruido, a continuación se trabajó con partición en bandas SAF. Como se mencionó en el capítulo anterior, se realizó tres simulaciones de filtros adaptativos con estructura en subbandas. La primera simulación fue la descomposición de la señal de entrada y deseada en cuatro subbandas con el algoritmo LMS y NLMS. La segunda simulación, fue la descomposición de la señal de entrada y deseada en cuatro subbandas usando banco de filtros de coseno-modulado, el algoritmo usado en esta simulación fue el LMS y NLMS (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009) con un factor de convergencia de 0.001. Y la última simulación fue la descomposición de la señal de entrada en cuatro subbandas usando banco de filtros de tipo DFT y con el algoritmo LMS y NLMS.

Se inició con la generación de la señal de voz $x(k)$ más ruido relacionada a través de un sistema lineal, para así generar la señal deseada $d(k)$. A la señal deseada, se le introdujo una señal ruidosa aleatoria por la presencia de ruido en ambientes reales. Como se analizó en las secciones de los algoritmos adaptativos y mejoramiento de la señal; el error $e(k)$, está estrechamente relacionado con el tamaño de paso μ , por tanto, el análisis de *SAF*, está enfocado al SNR producido a la salida del sistema a fin de obtener un MSE mínimo para la aplicación deseada en el proyecto.

En la Figura 18 y Figura 19, se comprobó que el sistema en subbandas converge satisfactoriamente obteniendo la señal deseada a la salida del sistema con un tamaño de filtro de $M=32$, excepto cuando se tiene una división de 64 bandas donde no converge al modelo deseado. En la Figura 18, se observó, que con un μ igual a 0.001 del LMS, el error converge aproximadamente después de 4000 muestras en cada una de las simulaciones, mientras que en la Figura 19, se observó que *SAF* con NLMS se estabiliza a partir de 2000 muestras aproximadamente con la simulación de banco de filtros de modulación compleja. También se observó en cada una de las curvas de aprendizaje de la Figura 18, que el sistema converge rápidamente pero a un nivel más alto del estado de equilibrio (-30 dB) cuando se tiene *SAF* críticamente muestreado debido al efecto *aliasing* presente en el procesamiento, por tanto no está modelando a la aplicación o a una señal desconocida, la otra curva de aprendizaje MSE de *SAF* sobremuestreado fue adecuado debido a que converge en el estado de equilibrio insertado (-20 dB) aunque su convergencia fue lenta por el efecto *band-edge*.

En la Figura 20 y 22, se comprobó que el sistema *SAF* con LMS necesita más muestras para converger cuando el tamaño del filtro fue $M=128$. A diferencia del *SAF* con NLMS de la Figura 21, el número de muestras tuvo un mínimo crecimiento comparado con *SAF* NLMS $M=32$.

En la Figura 40, se resume los valores del MSE de cada simulación descrita, con diferentes desajustes. Se comprobó que el sistema *SAF* responde satisfactoriamente a un desajuste entre -10 a -20 dB. El MSE mínimo fue cuando se usó los banco de

filtros con modulación compleja (Kong-Aik, Woon-Seng, & Sen M, 2009), dando un MSE entre -0.3904 y -0.2965 en -10 y -20 dB respectivamente.

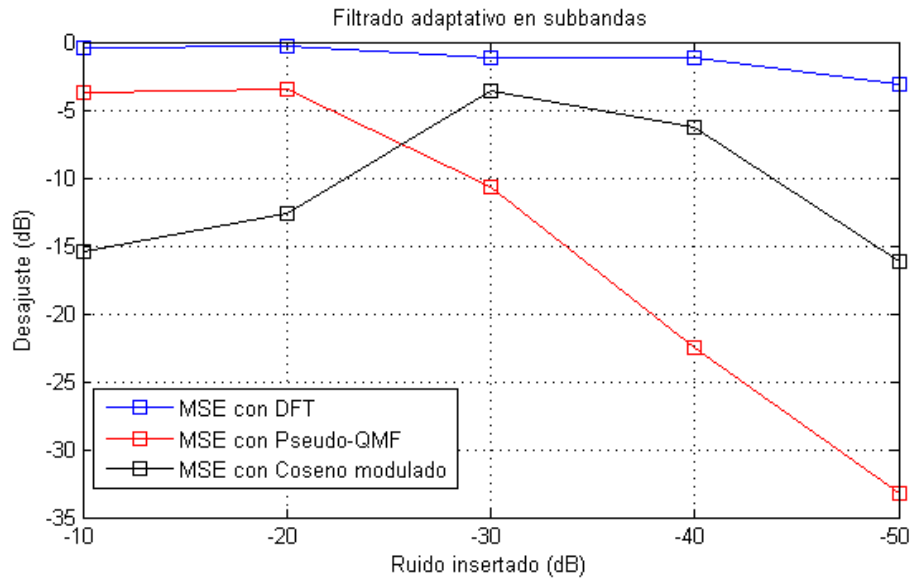


Figura. 40. Comparación del desajuste de SAF

Al variar el número de bandas de la señal de entrada $x(k)$ y deseada $y(k)$, se observó que el MSE y la convergencia del algoritmo, se altera dependiendo del tamaño del filtro. En relación al ruido presente en el sistema, el ruido es menor cuando la división en subbandas es menor.

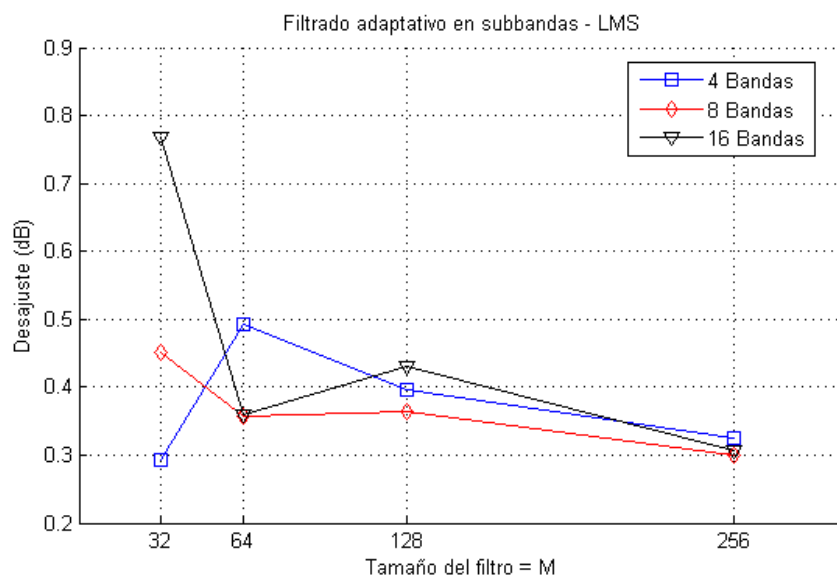


Figura. 41. Desajuste (dB) de cada N-Bandas

En la Figura 41 y 42, se presenta los resultados del MSE obtenidos en cada N -bandas divididas de SAF con LMS y NLMS respectivamente, variando el tamaño del filtro y con un tamaño de paso u de 0.1.

Como se visualiza en la Figura 41, el error cuadrático mínimo usando SAF con LMS fue cuando se tiene un tamaño del filtro $M=32$ con $N=4$ bandas y $M=256$ con $N=8$ bandas. En la Figura 42; para una longitud del filtro de $M=32$, el error cuadrático mínimo usando SAF con NLMS fue cuando la señal de entrada y la señal deseada están divididas en cuatro bandas. Para un tamaño del filtro de $M=64$, 128 y 256; el error cuadrático fue mínimo cuando la señal de entrada y deseada están divididas en ocho bandas. Si bien es cierto, se tiene una disminución del error cuadrático cuando el número de bandas dividido fue de $N=16$ con $M=256$, pero todo esto genera un alto costo computacional para el sistema. En resumen, el mínimo error cuadrático para el sistema SAF con una señal la señal de voz y tamaño de paso u de 0.1, fue de 0.1924 dB, por lo tanto, para el sistema de cancelación de ruido usando SAF con NLMS descrito en el proyecto, el tamaño óptimo del filtro y el número de bandas a dividir fue de 32 y 4 bandas respectivamente.

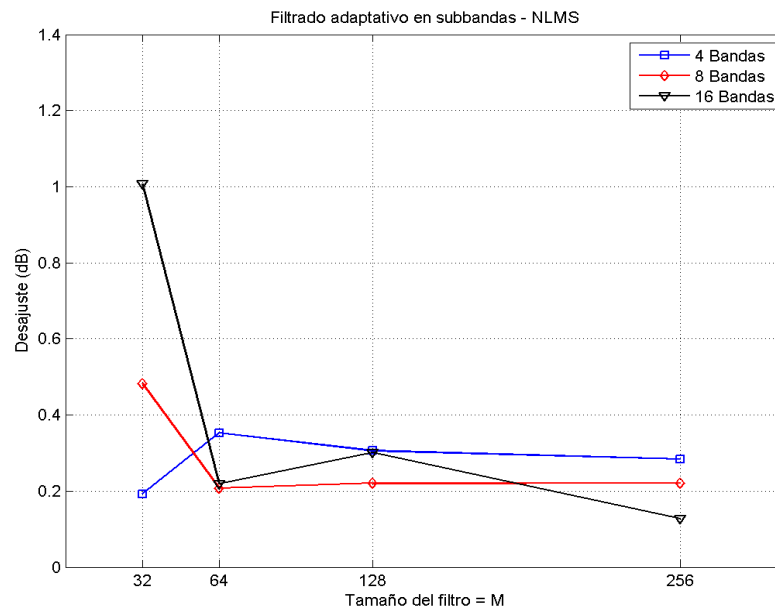


Figura. 42. Desajuste (dB) de cada N-Bandas

4.5.1 Propuesta

La propuesta, fue enfocada a los resultados obtenidos en cada uno de las secciones anteriores, y a la cancelación de ruido en aeronaves durante el chequeo sincronizado durante la comunicación por radio. La Sección 4.3 ayudó a entender la eficiencia de los algoritmos LMS, NLMS y RLS y su nivel de convergencia al variar el tamaño de paso μ . De igual manera, la Sección 4.4, ayudó a obtener el tamaño de paso óptimo para la aplicación en la cancelación de ruido en aeronaves. Como el objetivo del trabajo es cancelar el ruido usando *SAF*, en la Sección 4.5, se analizó y estudió la estructura *SAF* a fin de acoplarlo a la aplicación deseada. En la Tabla 5, se resume los valores y condiciones considerados óptimos de acuerdo a los resultados obtenidos.

Tabla. 5.
Recomendaciones para la aplicación deseada

ANÁLISIS	CONDICIÓN	OBSERVACIÓN
NLMS	$0,001 < \mu < 0,08$	Valores óptimos para la cancelación de ruido en aeronaves con el algoritmo NLMS
Factor de decimación e interpolación	$L \leq N$	No máximamente decimado o sobremuestreado, se puede mantener la información debido a la interacción entre la sección de análisis y síntesis. Aumenta la carga computacional.
Banco de filtros	DFT	Eficientes para aplicaciones de cancelación de ruido, donde se disminuye el costo computacional.
<i>SAF</i>	Estructura de lazo abierto	Fácil de implementar, se minimiza el error en cada subbanda,
Tamaño del filtro	32-64	Aumentando la longitud del filtro, no siempre mejora la velocidad de convergencia
Número de bandas	4-8 bandas	El error cuadrático fue mínimo en la división de 4 a 8 bandas

Para aplicaciones como la cancelación de ruido en aeronaves durante la comunicación por radio usando los *headset* de comunicación se requiere; que la

información llegue entendible y en el menor tiempo posible a los operadores y al piloto, por tal razón, de acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente, lo recomendable es: usar μ grandes, dado que, facilita una rápida respuesta a la tasa de convergencia a pesar de que aumente el ruido. Con respecto al factor de diezmado e interpolado, máximamente y no máximamente decimado, permitieron obtener la señal deseada al final de la simulación sin tener pérdida de información. Los bancos de filtros con modulación compleja, permitieron disminuir el costo computacional ocasionado por el factor de diezmado e interpolado. *SAF* de lazo abierto, fue una aplicación fácil de implementar donde, la señal de error de banda completa surge, sumando los errores de cada subbandas. Por último, se comprobó que fue suficiente usar de 4 a 8 subbandas, para obtener un MSE mínimo al final del sistema.

Tabla. 6.
SNR del Cancelador de Ruido

Tamaño de paso μ	$SNR_{Entrada}$ (dB)	SNR_{Salida} (dB) de NLMS	SNR_{Salida} (dB) de LMS	ΔSNR de NLMS	ΔSNR de LMS
0,0001	-60,0668	- 64,2122	- 65,7603	-24,279	-25,8271
0,001	-60,0668	- 69,4842	- 63,5550	-19,551	-23,6218
0,01	-60,0668	- 66,4076	- 69,2177	-16,4744	-19,2845
0,05	-60,0668	- 65,9696	- 66,8289	-69,7628	-16,8957

Realizando un análisis de la SNR de la entrada y salida del sistema de la Tabla 6, se obtuvo que al aumentar el valor del tamaño de paso μ la SNR a la salida del sistema disminuye, por consiguiente, para la aplicación, a mayor sea el tamaño de paso μ , más audible fue el audio al final del sistema aparentemente sin distorsión. Sin embargo, al aumentar el tamaño de paso, el MSE se distorsiona al final del sistema.

A fin de evaluar el desempeño de manera audible al sistema *SAF* DFT sobremuestreado, se pidió a los operadores de vuelo que califiquen de acuerdo a su subjetividad el grado de entendimiento del sistema *SAF* DFT sobremuestreado LMS y *SAF* DFT sobremuestreado NLMS en relación al número de bandas N.

En la Figura 43, el 90 % del personal que labora en el chequeo de la aeronave indicaron que la señal de audio es comprensible cuando se usa *SAF* DTF

sobremuestreado LMS con $N=4$ y $N=8$, aumentando el número de subbandas, el mensaje comienza a distorsionarse.

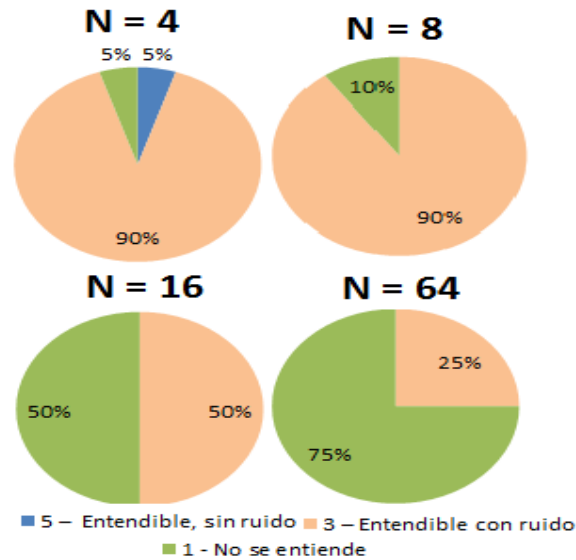


Figura. 43. Prueba de campo variando en número de subbandas con LMS

De la Figura 44 usando *SAF* DFT sobremuestreado NLMS, se resume que el audio al final de su procesamiento es más clara cuando se divide a la señal en $N=4$ y $N=8$ bandas, mientras más se aumente el número de bandas, el mensaje se distorsiona y no es entendible. En resumen, se recomienda usar *SAF* con el algoritmo NLMS dado que garantiza un mejor entendimiento del mensaje al final del sistema.

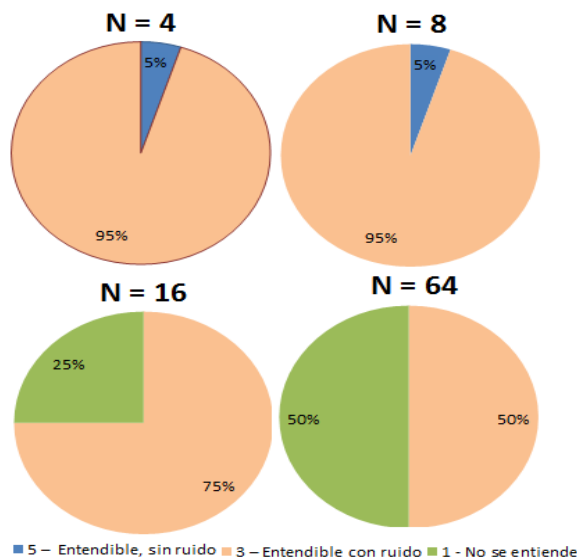


Figura. 44. Prueba de campo variando en número de subbandas con NLMS

Para evaluar el rendimiento del sistema, se generó el algoritmo *Modified Bark Spectral Distortion measure* (Yang, 2005) donde, fueron cargadas la señal original y la procesada a una frecuencia de 8KHz y con un tamaño de 20 ms. Se tomó el retardo producido debido al procesamiento del sistema, al final, se obtuvo una medida de SNR en dB.

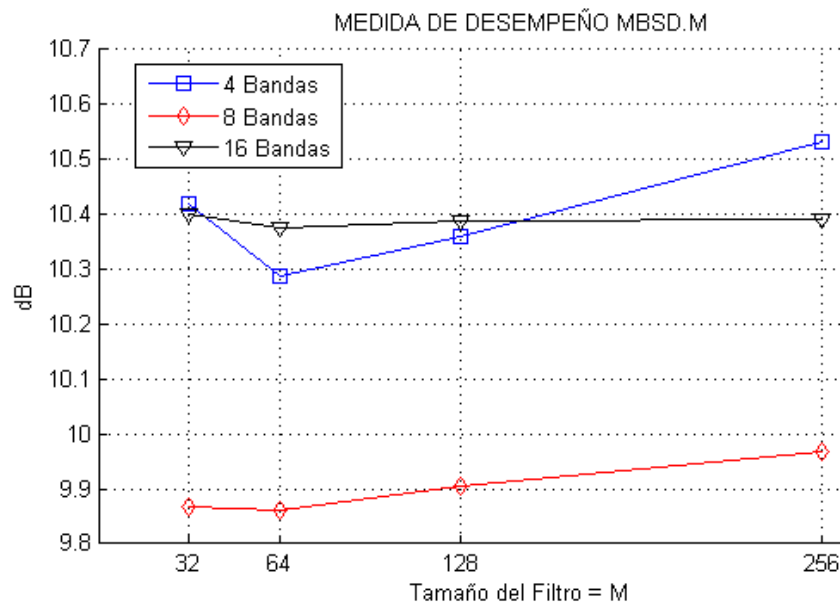


Figura. 45. Medición cuantitativa del procesamiento SAF

Como se puede visualizar en la Figura 45, se garantiza una ganancia aproximada de 10,4 dB con $N=4$ y $N=16$ bandas, por consiguiente, se valida y se recomienda utilizar el algoritmo SAF DFT sobremuestreado NLMS para la cancelación de ruido en aviones con una división mínima de bandas.

Análisis de costos

El análisis de costos se determinó acorde a ciertos equipos existentes en el mercado y al algoritmo estructurado. Por consiguiente, en la Tabla 7, se resume los costos/beneficio del presente proyecto.

Tabla. 7.
Costo del proyecto

PRODUCTO	VALOR
Software	\$ 50
Internet	\$ 50
DSP, FPGA	\$ 200
Varios	\$ 20
TOTAL	\$ 320

Con el sistema propuesto, se pretende reducir los costos de la aplicación en un 40% comparado con los ya existentes en el mercado, como por ejemplo, lo equipos trulink con un costo de \$ 1500, los BlueNAC \$550 o los equipos de marca Pertor en \$ 460. Cabe mencionar que el sistema propuesto no pretende ser un elemento sustitutivo a los existentes en el mercado, sino un elemento complementario para el servicio de la FAE.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo del proyecto de entender el mensaje fue validado encontrando un sistema de bajo costo económico para el uso en los aviones de la FAE donde se reciben órdenes claras y concisas, la percepción del audio es una medida cualitativa del cual dependerá del usuario.

Se verificó los niveles de ruido en el ambiente real, valores que permitieron tener una perspectiva de la potencia de ruido en que está expuesto un operador y el piloto.

Para la cancelación de ruido usando *SAF*, se recomienda usar el algoritmo NLMS con un paso de adaptación de $0,001 < \mu < 0,008$ dado que garantiza una rápida convergencia y una mejor reducción del error cuadrático, estos valores son eficiente para la presente aplicación y pueden ser ineficientes para otras aplicaciones.

Por otro lado, el RLS, es un algoritmo eficiente, no obstante, no mantiene una estabilidad en todo el sistema. La línea de investigación con estos algoritmos queda abierta a varias pruebas, dado que la convergencia y la reducción del MSE dependen de la aplicación a analizar.

Los bancos de filtros con DFT en concordancia con el proceso de diezmado e interpolado, permitieron mejorar la carga computacional y reducir el efecto *aliasing* presente durante el procesamiento de la señal, el factor de decimación e interpolación $L \leq N$ (no máximamente decimado o sobremuestreado) permitió estabilizarse en el

estado de equilibrio de -20 dB garantizando un modelamiento del sistema acorde a la aplicación de cancelación de ruido en aeronaves.

Las pruebas realizadas con *SAF* y el ruido de la aeronave para la aplicación de cancelación de ruido, dan como resultado que; se puede disminuir el tiempo de respuesta cuando se aumenta el tamaño de paso u , aunque, el ruido aumenta. Por consiguiente, lo que se buscó en la investigación es un audio entendible al final del sistema con una respuesta rápida y con un MSE mínimo acorde a la aplicación para así ser probado en un ambiente real.

Para la aplicación descrita, la comprensión del audio transmitido se dio entre $N=4$ bandas divididos uniformemente usando *SAF* DFT sobremuestreado LMS y *SAF* DFT sobremuestreado NLMS. Al aumentar el número de bandas divididos a $N=64$, se distorsionó el mensaje.

Se concluyó que con un tamaño de filtro $M=256$ y $N=16$ se tiene una mejora significativa comparado con un tamaño de filtro $M=32$ y $M=64$ usando *SAF* DFT sobremuestreado NLMS, sin embargo, esta ganancia tiene un costo computacional elevado.

Con las mediciones de campo donde el operador de vuelo calificó el grado de comprensión de la voz al final de su procesamiento, se pudo demostrar, que el algoritmo *SAF* DFT sobremuestreado NLMS presenta una ligera ventaja de comprensión del audio con respecto a *SAF* DFT sobremuestreado LMS, especialmente cuando se divide a la señal en $N=4$ y $N=8$ bandas.

Debido a la flexibilidad, robustez y versatilidad del procesamiento digital en señales acústicas, se puede decir que el diseño propuesto en este trabajo, puede ser usado para otras aplicaciones diferentes a la cancelación del ruido como por ejemplo; en la cancelación del eco acústico, codificación de audio, ruido presente en auditorios, entre otros. Probablemente el investigador requiera modificar o migrar

codificación o algoritmos debido a la configuración y el diseño exclusivo para el ambiente analizado.

El algoritmo *mbsd.m* permitió demostrar cuantitativamente la ganancia en dB del algoritmo *SAF* DFT sobremuestreado NLMS con respecto a *SAF* DFT sobremuestreado LMS, por tal motivo se recomienda utilizar el algoritmo *SAF* con el algoritmo NLMS con una división $N=4$ bandas.

Con la finalización del proyecto y para conocer el buen desempeño del algoritmo, se recomienda hacer la evaluación en el entorno laboral, su implementación en un *DSP*, *FPGA* o *VLSI*, validarán los resultados obtenidos en cada simulación, a fin de ponerlo en práctica en operaciones de búsqueda y rescate de personas, mantenimiento de las aeronaves, chequeo de los aviones en los hangares u otras actividades propias de la FAE.

Del mismo modo se propone estudiar y analizar el mejoramiento de la señal de voz con otros esquemas de procesado como el filtrado adaptativo con estructura multibandas del cual se habla en el Capítulo 2. Otra alternativa a la cancelación adaptiva del ruido es usando *ADALINES*, en (Loeff & Cardelino, 2012), se puede visualizar el estudio realizado con *ADaptive Linear Neuron* del cual consiste en una etapa de combinación lineal de las entradas y suma de un valor constantes y una segunda etapa en donde la salida es una función de la etapa anterior, a través de la línea del tiempo, se podrá ver más esquemas que permitan solucionar el problemas de ruido durante una comunicación por radio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3M company. (2011). *SoundPro User Manual*. Copyright.
- Abid Noor, A., Abdul Samad, S., & Hussain, A. (2013). *A Review of Advances in Subband Adaptive Filtering*. Malaysia: Universidad Kebagsan.
- Aholab, t. (2000, Noviembre). *Signal processing laboratory*. Retrieved from Filtrado adaptativo: <http://bips.bi.ehu.es/prj/ruido/>
- Ardalan, S. (1986). *Floating-point analysis of recursive least-squares and least-mean squares adaptive filters*. IEEE .
- Azpicueta, L. (2011). *Aplicación de algoritmos combinados de filtrado adaptativo a acústica de salas*. Madrid: Tesis Doctoral Universidad Carlos III.
- Benavides Aspiazu, J., Calienes Bartra, W., & Silva Cárdenas, C. (2009). *Diseño de una Arquitectura para la Implementación de un Filtro Adaptativo RLS sobre un FPGA*. Buenos Aires: Workshop Iberchip.
- Bulkool Batalheiro, P. (2009). *Novos Algoritmos em Subbandas para Filtragem Adaptativa e Separação Cega De Fontes*. Rios de Janeiro: UFRJ/COPPE.
- Chau, E., Sheikhzadeh , H., & Brennan, R. (2004). *Complexity reduction and regularization of a fast affine projection algorithm for oversampled subband adaptive filters*. ICASSP.
- Darlington, D., & Campbell, D. (1996). *Sub-Band Adaptive Filtering Applied to Speech Enhancement*. Paisley.
- Diniz, P. (2008). *Adaptive Filtering: Algorithms And Practical Implementation*. Rio de Janeiro: Springer.

- Dornean, I., Topa, M., Kirei, B., & Neag, M. (2009). *Sub-Band Adaptive Filtering for Acoustic Echo Cancellation*. Romania: IEEE.
- ETSI telecomunicacion. (2013, marzo 13). *Laboratorio de procesado de imagen*. Retrieved from Ruido en aviones: http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io6/public_html/aviones.html
- Farhang-Boroujeny, B. (2013). *Adaptive Filters: Theory and Applications*. University of Utah, USA: John Wiley & Sons, ltd.
- Fuerza Aerea Ecuatoriana. (2010). *Manual de mantenimiento de aviones militares*. Quito.
- Garcia Lopez, J. (2007). *Procesamiento Digital de Señales*. Ciro Andres.
- Garcia, L. (2006). *Cancelación de Eco Multicanal*. Madrid: Copyright.
- Gilloire, A., & Vetterli, M. (2009). *Adaptive Filtering in subbands with critical sampling: Analysis, experiments and application to acoustic echo cancellation*. August.
- Hansler, E., & Schmidt, G. (2000). *Hands-free telephones – joint control of echo cancellation and postfiltering*. Elsevier Science B.V. .
- Haykin, S. (1991). *Adaptive Filter Theory*. Ontario Canada: ISBN.
- Inc, Name Administration. (2013, marzo 16). *ProgramNation.com*. Retrieved from El procesamiento de señales digitales en el mundo actual: <http://www.programnation.com/dsp-actual/>
- Inc, Name Administration. (2013, marzo 16). *ProgramNation.com*. Retrieved from El procesamiento de señales digitales en el mundo actual: <http://www.programnation.com/dsp-actual/>
- Islam, S., Jidin, R., & Ali, M. (2009). *Performance study of adaptive filtering algorithms for noise cancellation of ECG signal*. Malaysia.

- ITU-T. (1993). General Characteristics of International Telephone Connections and International Telephone Circuits – Acoustic Echo Controllers. *ITU-T Recommendation G.167*, ITU.
- Kong-Aik, L., Woon-Seng, G., & Sen M, K. (2009). *Subband Adaptive Filtering: theory and implementation*. United Kingdom: John Wiley and Sons.
- Lee , K., & Gan, W. (2004). *Subband adaptive filtering using constrained subband updates*. IEEE.
- Loeff, N., & Cardelino, J. (2012, Mazo 26). *Instituto de Ingenieria Electrica*. Retrieved from Cancelación Adaptiva de Ruido Usando Adalines:
http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/sisdsp/proyectos/2000/ruido_adaline/
- Marques, P. A. (2002). *Introdução à Filtragem Adaptativa*. Lisboa.
- McClellan, J., & Parks, T. (2005). *A personal history of the Parks-McClellan algorithm*. IEEE.
- Milani, A., Panahi, I., & Loizou, P. (2009). *New delayless Subband Adaptive Filtering Algorithm for active Control Systems*. IEEE.
- Monroy, M. (2006). *Manual de Ruido, Calidad Ambiental en la Edificación*. Gran Canaria: ISBN: 84-690-0893-5.
- Moonen, M. (2002). *Subband And Frequency-Domain Adaptive Filtering Techniques For Speech Enhancement In Hands-Free Communication*. Belgica.
- Muñoz, M. (n.d.). *Nociones básicas de vuelo, manualvuelo.com*. CQ Counter.
- Nac Intercom. (2014, Enero). *Bluenac 3000*. Retrieved from <http://www.nac-inter.com/Aviacion/microauriculares-aviacion/aviacion-micro-nac>

- Organizacion Mundial de la Salud. (2009). *Night Noise Guidelines for Europe*. Layout by Dagmar Bengs.
- Organizacion Mundial de la Salud. (2013, Noviembre 5). *Función de la OMS en la salud pública*. Retrieved from <http://www.who.int/about/role/es>
- Poonam, R., Harsim, S., & Nidhi, B. (2012). *Subband adaptive filter for noise cancellation*. Volume 1.
- Transaeroinc. (2014, Enero 2). *Transaero delivering innovative technology*. Retrieved from TruLink® Wireless Voice Communications Air Ambulance and Medevac: <http://www.transaeroinc.com/Life%20Support/man/Telephonics%20Corporation/TruLink%C2%AE%20Wireless%20Voice%20Communications%20Air%20Ambulance%20and%20Medevac>
- Yang, W. (2005). *Modified bark spectral distortion measure, Programa para calcular la medida de desempeño, mbsd.m*.
- Zavala, h. E., & Gonzalez, S. L. (1999). *Diseño de filtros FIR mediante mínimos cuadrados*. Lima: unmsm.